

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Diagnostika fotovoltického systému

Diagnostics of PV system

2020

Bc. Ondřej Lasák

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Lasák**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Diagnostika fotovoltaického systému
Diagnostics of PV system
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický úvod - komponenty fotovoltaického systému
2. Legislativa v oblasti fotovoltaických systémů, ČSN
3. Praktické měření - diagnostika fotovoltaického systému
4. Závěr - vyhodnocení měření, analýza, doporučení

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Lo Piano, Samuele; Mayumi, Kozo (2017). "Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic systems for electricity generation". Applied Energy. 186 (2): 167–74. doi:10.1016/j.apenergy.2016.05.102.
- [2] Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. 7 November 2013.
- [3] Renewable Energy Policy Network for the 21st century (REN21), Renewables 2010 Global Status Report, Paris, 2010, pp. 1–80.
- [4] Luque, Antonio & Hegedus, Steven (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley and Sons. ISBN 978-0-471-49196-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *30. dubna 2020*


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Lukášovi Prokopovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi při tvorbě mé diplomové práce poskytl.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je provedení diagnostiky vybraného fotovoltaického systému. V úvodu se práce zabývá obecnou teorií fotovoltaiky a fotovoltaických systémů. Další část práce se již zaměřuje na defekty, které mají vliv na účinnost celého fotovoltaického systému. Následující část se zabývá diagnostikou fotovoltaických systémů dle ČSN. V poslední části práce je popsáno konkrétní měření, které bylo realizováno pomocí měřicího přístroje METREL Eurotest PV MI 3108 a termokamery FLIR T420. Tyto přístroje a měřený systém jsou zde stručně popsány. Závěr práce obsahuje vyhodnocení měření a doporučení.

Klíčová slova

Fotovoltaický systém; Fotovoltaický panel; String; Invertor; Degradace; Výkon; Napětí naprázdno; Proud nakrátko; STC; Účinnost.

Abstract

The aim of the thesis is to perform diagnostics of a selected photovoltaic system. The introduction deals with the general theory of photovoltaics and photovoltaic systems. The next part of the thesis focuses on defects that affect the efficiency of the entire photovoltaic system. The following part deals with diagnostics of photovoltaic systems according to ČSN. In the last part of the thesis is described concrete measurement, which was realized by measuring instrument METREL Eurotest PV MI 3108 and thermocamera FLIR T420. These instruments and the measured system are briefly described here. The conclusion of the thesis includes evaluation of measurement and recommendations.

Key words

Photovoltaic system; Photovoltaic panel; String; Inverter; Degradation; Performance; Open circuit voltage; Short circuit current; STC; Efficiency.

Obsah

Úvod.....	- 13 -
1 Historie fotovoltaiky	- 14 -
2 Fyzikální princip polovodičového fotovoltaického článku	- 15 -
2.1 Základní princip fungování a konstrukce krystalického křemíkového fotovoltaického článku	- 17 -
3 Elektrické parametry fotovoltaických článků.....	- 19 -
3.1 Matematický model.....	- 19 -
3.2 Voltampérová charakteristika.....	- 20 -
3.3 Proud nakrátko – I_{SC}	- 20 -
3.4 Napětí naprázdno – U_{OC}	- 20 -
3.5 Pracovní bod – PB	- 20 -
3.6 Bod maximálního výkonu článku – MPP	- 21 -
3.7 Činitel plnění (Fill factor – FF).....	- 21 -
3.8 Účinnost fotovoltaického článku – EEF	- 21 -
3.9 Sériový a paralelní odpor – R_s a R_p	- 22 -
4 Generace fotovoltaických článků	- 23 -
4.1 První generace	- 23 -
4.2 Druhá generace.....	- 23 -
4.3 Třetí generace.....	- 23 -
4.4 Čtvrtá generace.....	- 23 -
5 Typy fotovoltaických systémů	- 24 -
5.1 Autonomní fotovoltaické systémy (Off-Grid).....	- 24 -
5.2 Hybridní fotovoltaické systémy	- 24 -
5.3 Systémy připojené k elektrické síti (On-Grid)	- 25 -
6 Prvky fotovoltaických systémů	- 27 -
6.1 Invertor	- 27 -
6.2 Akumulátorová baterie	- 28 -
6.3 Regulátor nabíjení	- 28 -
6.4 Nosné konstrukce	- 29 -
6.5 Jistící a spínací prvky	- 30 -
6.6 Kabelová vedení.....	- 30 -

7	Účinnost fotovoltaických systémů	32 -
7.1	Defekty fotovoltaických článků	32 -
7.2	Defekty fotovoltaických panelů	33 -
7.3	Negativní vlivy ovlivňující účinnost fotovoltaických systémů	37 -
7.4	Další možnosti navýšení účinnosti fotovoltaických systémů	40 -
8	Kontrola fotovoltaických systémů dle ČSN EN 62446-1	42 -
9	Faktory způsobující chyby měření	48 -
10	Popis použitých měřicích přístrojů.....	49 -
10.1	METREL Eurotest PV MI 3108.....	49 -
10.2	Příslušenství k přístroji MI 3108.....	50 -
10.3	Termokamera	53 -
11	Popis měřeného fotovoltaického systému	54 -
12	Měření na fotovoltaickém systému	57 -
12.1	Příprava před měřením	57 -
12.2	Měření parametrů okolí	60 -
12.3	Měření izolačního odporu	62 -
12.4	Měření U_{OC} a I_{SC}	64 -
12.5	Měření I-V křivek.....	66 -
12.6	Test FV panelů ve stringu	74 -
12.7	Test invertoru	76 -
12.8	Dokončení měření	78 -
12.9	Kontrola pomocí termokamery	79 -
13	Vliv zastínění na výkon fotovoltaického panelu	81 -
13.1	Parametry měřeného panelu	81 -
13.2	Nezastíněný FV panel	81 -
13.3	Zastínění dvou článků FV panelu.....	83 -
13.4	Zastínění jedné svislé řady článků FV panelu.....	84 -
13.5	Zastínění jedné vodorovné řady článků FV panelu.....	86 -
13.6	Zastínění dvou vodorovných řad článků FV panelu.....	87 -
14	Závěr	89 -
15	Seznam použité literatury	91 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol		Význam symbolu
AC		Střídavá síť
A_{FV}	$[m^2]$	Ozářená plocha
AM		Vzduchová hmota
$ČSN$		Česká státní norma
D		Dioda
DC		Stejnoseměrná síť
FF		Činitel plnění
FSV		Fakulta stavební
FV		Fotovoltaický
HDS		Hlavní domovní skříň
I	$[A]$	Proud
IEC		Mezinárodní elektrotechnická komise
I_{mp}	$[A]$	Proud v bodě maximálního výkonu
I_{rr}	$[W/m^2]$	Intenzita slunečního záření
I_{SC}	$[A]$	Proud nakrátko
J_{FV}	$[A/m^2]$	Proudová hustota
LID		Degradace světlem
MPP		Bod maximálního výkonu
P	$[W]$	Výkon
PB		Pracovní bod
PC		Počítač
PID		Potenciální indukovaná degradace
P_{in}	$[W]$	Výkon dopadajícího slunečního záření
RCD		Proudový chránič
R_P	$[\Omega]$	Paralelní odpor
R_S	$[\Omega]$	Sériový odpor
STC		Standardní testovací podmínky
U	$[V]$	Napětí
U_D	$[V]$	Napětí na diodě
U_{mpp}	$[V]$	Napětí v bodě maximálního výkonu
U_{OC}	$[V]$	Napětí naprázdno
UV		Ultrafialové záření

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Princip fotovoltaického článku [24]	- 17 -
Obrázek č. 2 Graf energetické bilance krystalického křemíkového fotovoltaického článku [3]	- 18 -
Obrázek č. 3 Matematický model fotovoltaického článku [2]	- 19 -
Obrázek č. 4 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [2]	- 20 -
Obrázek č. 5 Autonomní fotovoltaický systém [37]	- 24 -
Obrázek č. 6 Fotovoltaický systém při zapojení v „Zeleném tarifu“ [37]	- 25 -
Obrázek č. 7 Fotovoltaický systém při zapojení ve „Výkupním tarifu“ [37]	- 26 -
Obrázek č. 8 Rozdělení invertorů dle zapojení [2]	- 27 -
Obrázek č. 9 Akumulátorová baterie [25]	- 28 -
Obrázek č. 10 Regulátor nabíjení [27]	- 29 -
Obrázek č. 11 Virový defekt a vnitřní pnutí materiálu [28]	- 32 -
Obrázek č. 12 Nehomogenita difuzní vrstvy [28]	- 33 -
Obrázek č. 13 Funkce bočnickových diod [39]	- 34 -
Obrázek č. 14 Připojovací krabice pro bočnickové diody [41]	- 34 -
Obrázek č. 15 Horká místa na fotovoltaických panelech [29]	- 35 -
Obrázek č. 16 Šnečí cesty [30]	- 36 -
Obrázek č. 17 Delaminace fotovoltaického panelu [16]	- 36 -
Obrázek č. 18 Potenciální indukovaná degradace [3]	- 37 -
Obrázek č. 19 Sněhová pokrývka na fotovoltaickém systému [38]	- 38 -
Obrázek č. 20 Znečištění panelu [31]	- 39 -
Obrázek č. 21 Oboustranné fotovoltaické panely [32]	- 40 -
Obrázek č. 22 Natáčecí moduly [33]	- 41 -
Obrázek č. 23 Měřicí přístroj METREL Eurotest PV MI 3108 [35]	- 49 -
Obrázek č. 24 Vzdálená jednotka A 1378 [35]	- 50 -
Obrázek č. 25 AC/DC proudové kleště A 1391 [35]	- 50 -
Obrázek č. 26 AC proudové kleště A 1018 [34]	- 51 -
Obrázek č. 27 PV bezpečnostní sonda A 1384 [35]	- 51 -
Obrázek č. 28 Sonda pro měření teploty A 1400 [35]	- 52 -
Obrázek č. 29 Monokrystalický PV referenční článek A 1427 [35]	- 52 -
Obrázek č. 30 PV měřicí vodič A 1385 [35]	- 53 -
Obrázek č. 31 Termokamera FLIR T420 [36]	- 53 -
Obrázek č. 32 Schéma měřeného fotovoltaického systému	- 55 -
Obrázek č. 33 Invertor AURORA PVI-12.5-OUTD-FS-CZ	- 56 -
Obrázek č. 34 Zapojení přístroje při synchronizaci [6]	- 57 -
Obrázek č. 35 Struktura měření v programu EuroLink PRO	- 60 -
Obrázek č. 36 Schéma zapojení – měření parametrů okolí [6]	- 61 -
Obrázek č. 37 Reálné zapojení – měření parametrů okolí (teplotní sonda a referenční článek)	- 61 -
Obrázek č. 38 Reálné zapojení – měření parametrů okolí (propojení se vzdálenou jednotkou)	- 62 -
Obrázek č. 39 Schéma zapojení – měření izolačního odporu [6]	- 63 -
Obrázek č. 40 Reálné zapojení – měření izolačního odporu	- 63 -
Obrázek č. 41 Schéma zapojení – měření U_{0C} a I_{SC} [6]	- 65 -
Obrázek č. 42 Reálné zapojení – měření U_{0C} a I_{SC}	- 65 -

<i>Obrázek č. 43 I-V křivky pro string č. 5 – měření č. 1</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Obrázek č. 44 I-V křivky pro string č. 5 – měření č. 2</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Obrázek č. 45 I-V křivky pro string č. 6 – měření č. 1</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Obrázek č. 46 I-V křivky pro string č. 6 – měření č. 2</i>	<i>- 72 -</i>
<i>Obrázek č. 47 I-V křivky pro string č. 7 – měření č. 1</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Obrázek č. 48 I-V křivky pro string č. 7 – měření č. 2</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Obrázek č. 49 Schéma zapojení – test FV panelů ve stringu [6]</i>	<i>- 75 -</i>
<i>Obrázek č. 50 Reálné zapojení – test FV panelů ve stringu</i>	<i>- 75 -</i>
<i>Obrázek č. 51 Schéma zapojení – test invertoru [6]</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Obrázek č. 52 Reálné zapojení – test invertoru</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Obrázek č. 53 Horká místa na panelech způsobená poškozením článků</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Obrázek č. 54 Horká místa na panelech způsobená znečištěním</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Obrázek č. 55 Horká místa na panelech způsobená zastíněním</i>	<i>- 80 -</i>
<i>Obrázek č. 56 Schéma – nezastíněný FV panel</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Obrázek č. 57 I-V křivky nezastíněného FV panelu</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Obrázek č. 58 Schéma – zastínění dvou článků FV panelu</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Obrázek č. 59 I-V křivky při zastínění dvou článků FV panelu</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Obrázek č. 60 Schéma – zastínění jedné svislé řady článků FV panelu</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Obrázek č. 61 I-V křivky při zastínění jedné svislé řady článků FV panelu</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Obrázek č. 62 Schéma – zastínění jedné vodorovné řady článků FV panelu</i>	<i>- 86 -</i>
<i>Obrázek č. 63 I-V křivky při zastínění jedné vodorovné řady článků FV panelu</i>	<i>- 86 -</i>
<i>Obrázek č. 64 Schéma – zastínění dvou vodorovných řad článků FV panelu</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Obrázek č. 65 I-V křivky při zastínění dvou vodorovných řad článků FV panelu</i>	<i>- 88 -</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka č. 1 Energetická bilance krystalického křemíkového fotovoltaického článku [3]</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tabulka č. 2 Hodnoty testovacího napětí a minimálních izolačních odporů [4]</i>	<i>- 46 -</i>
<i>Tabulka č. 3 Počet panelů ve stringu</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Tabulka č. 4 Parametry FV panelů [6]</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Tabulka č. 5 Nastavení parametrů panelů pro měřený FV systém.....</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabulka č. 6 Parametry FV měření [6]</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabulka č. 7 Nastavení FV měření pro měřený systém</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Tabulka č. 8 Naměřené hodnoty izolačních odporů.....</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Tabulka č. 9 Naměřené hodnoty z měření U_{OC} a I_{SC}.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Tabulka č. 10 Naměřené hodnoty z měření I-V křivek - měření č. 1</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Tabulka č. 11 Naměřené hodnoty z měření I-V křivek - měření č. 2</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Tabulka č. 12 Odchyłky vůči hodnotám, které jsou dány výrobcem panelů - měření č. 1</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Tabulka č. 13 Odchyłky vůči hodnotám, které jsou dány výrobcem panelů - měření č. 2</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Tabulka č. 14 Naměřené hodnoty při testu FV panelů ve stringu.....</i>	<i>- 76 -</i>
<i>Tabulka č. 15 Naměřené hodnoty při testu invertorů FV.....</i>	<i>- 78 -</i>

Úvod

V dnešní době se stále zvyšují nároky na množství vyrobené elektrické energie. Zároveň s tím však rostou i nároky na ekologii její výroby. Z toho důvodu dochází ke snaze nahradit klasické zdroje elektrické energie, jako jsou například uhelné, jaderné nebo plynové elektrárny. U uhelných a plynových elektráren je největším problémem vysoká produkce oxidu uhličitého a dalších nežádoucích látek. U jaderných elektráren je zase problém se skladováním vyhořelého paliva.

To má za následek velkých rozmach výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, které mají na ekologii daleko menší dopad. Mezi obnovitelné zdroje patří například vodní, větrné, geotermální či vlnové elektrárny. Velký podíl na vyrobené energii z obnovitelných zdrojů mají však i fotovoltaické elektrárny (dále také fotovoltaické systémy).

Velkou nevýhodou fotovoltaických systémů je jejich poměrně malá účinnost. Ta může být navíc snížena různými defekty, které mohou mít za následek vysoké výkonové, a tím i ekonomické ztráty. Aby se těmto ztrátám předešlo, je zapotřebí pravidelně provádět údržbu a kontrolu systémů, při kterých se diagnostikují případné defekty. Právě diagnostikou fotovoltaických systémů se tato práce dále zabývá.

1 Historie fotovoltaiky

Všechno to začalo v roce 1839, kdy francouzský fyzik Alexandr Edmond Becquerel při experimentech s kovovými elektrodami ponořenými v elektrolytu zjistil, že při osvětlení elektrod jimi začne procházet malý proud. V roce 1877 vytvořili William Grylls Adams a Richard Evans Day první skutečný fotovoltaický článek s použitím selenu (jen v tuhé bázi, bez elektrolytu). Další významný posun učinil roku 1883 Charles Fritts. Jeho první články s plochou 30 cm² měly účinnost kolem 1 %, a jejich výroba šla provádět hromadně. Kvůli nízké účinnosti však ještě ke komerční výrobě a praktickému využití nedošlo. Později Grondahl pro fotovoltaické články použil oxid měďný vytvořený v tenké vrstvě na měděném plechu. Odtud se proud nejdříve odváděl spirálou z olověného drátu, později kovovou mřížkou vytvořenou napařením. Toto uspořádání se již podobalo dnešním fotovoltaickým článkům. Výhodami této technologie byly cena a dostupnost materiálu. Nevýhodou však byla účinnost, která byla stále příliš nízká. [1]

Teoretické objasnění fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem, za které dostal v roce 1921 Nobelovu cenu, mělo zásadní vliv na další vývoj fotovoltaických technologií. Významný krok na cestě k moderním fotovoltaickým článkům učinil v USA v roce 1946 Jan Czochralski vyvinutím přípravy monokrystalů křemíku, kterou si nechal Russell S. Ohl patentovat. V roce 1954 vyrobili v Bellových laboratořích křemíkové fotovoltaické články, dopované jiným prvkem s účinností kolem 6 %. Tato účinnost již byla dostačující pro praktické využití, ale cena byla příliš vysoká, z důvodu nutného použití velmi čistého křemíku. [1] [2]

První aplikace fotovoltaických článků byla provedena v roce 1957, kdy byly použity jako zdroje energie v kosmonautice. Zde cena nehrála roli, protože fotovoltaické články byly a stále jsou ideálním zdrojem pro napájení satelitů. První komerční využití fotovoltaických článků bylo provedeno u miniaturní elektroniky (hodinky, kalkulačky), kde články sloužily jako zdroj energie. Největší impuls v rozvoji fotovoltaické energie způsobila ropná krize v roce 1973, která nastartovala proces efektivnější výroby a využití elektrických zdrojů. V posledních letech se fotovoltaické systémy rychle rozvíjejí, hlavně díky dotačním programům, které způsobily velký zájem investorů o tuto oblast energetiky. Předpokládá se, že pro udržení stávajícího rozvoje lidské civilizace budou hrát obnovitelné zdroje, a tím tedy i fotovoltaické systémy zásadní roli. [1] [2]

2 Fyzikální princip polovodičového fotovoltaického článku

Aby bylo možné přeměnit energii fotonů ze slunečního záření na energii pohybujících se elektronů (elektrický proud), jsou potřebné v zásadě jen dvě věci:

- volné elektrony,
- elektrické pole (potenciál), které je uvede do pohybu správným směrem, tj. ze zdroje do spotřebiče. [1]

Volné elektrony jsou k dispozici ve všech kovech, tudíž nepředstavují žádný problém. Problém je, jak jim dodat potřebnou energii a usměrnit jejich tok směrem, který je potřeba. Již od 19. století je známo, že pokud dopadá na povrch kovu záření, dochází k uvolňování elektronů z jeho povrchu. Pokud je energie záření dostatečně velká, vylétne z povrchu kovu elektron, který po sobě v kovu zanechá kladný náboj – fyzikové jej nazývají dírou. Jedná se o takzvaný fotoelektrický jev. Pokud však elektron zůstane v kovu, pak je zase velmi rychle vtažen do nějaké díry a jeho energie je zmařena (uvolní se jako neúčinné teplo). Je proto potřeba od sebe oddělit elektrony a díry a donutit elektrony, aby dříve, než zapadnou zpět do díry, prošly elektrickým obvodem a svou získanou energii ze slunečního záření vydaly ve formě užitečné práce ve spotřebiči. Toto oddělení se dá lépe uskutečnit v polovodičích než v kovech. [1]

Polovodiče jsou látky, jejichž elektrické vlastnosti se nacházejí někde mezi kovy a izolanty. To znamená, že v nich nejsou volné elektrony jako v kovech, ale poměrně snadno tam mohou vzniknout, například teplem nebo dopadem slunečního záření. K výše zmíněnému oddělení elektronu z děr je nutno v polovodiči vytvořit takzvaný PN přechod. Tento přechod je základem celé moderní elektroniky. Pochopení funkce PN přechodu je důležité pro pochopení principu fotovoltaického článku. [1]

Vznik PN přechodu lze vysvětlit na nejběžnějším polovodičovém materiálu, kterým je křemík. Ve váleční sféře atomu křemíku se nachází čtyři elektrony. To tedy znamená, že je zaplněna jen z poloviny a potřebuje nějak získat čtyři elektrony, aby dosáhla stabilního uspořádání. V krystalu křemíku tedy každý atom zaujme takové uspořádání, při kterém sdílí čtyři elektrony se sousedními atomy. Proto je tuhý křemík tvořen mřížkou atomů křemíku, které jsou vzájemně spojeny kovalentními vazbami. Na rozdíl od kovů se v tomto materiálu žádné volné a k atomům nevázané elektrony nevyskytují. Přísně vzato to ovšem platí pouze při velmi nízkých teplotách. Při pokojové teplotě již dochází příčinou tepelných kmitů k přerušení některých vazeb a k uvolnění malého množství elektronů. To je způsobeno pevností kovalentních vazeb u křemíku, které totiž nejsou zdaleka tak pevné, jako je tomu například u uhlíku. U křemíku stačí dodat poměrně malé množství energie k tomu, aby se elektrony uvolnily z vazeb. To je způsobeno tím, že křemík má poměrně malou šíři zakázaného pásu (rozdíl energie mezi posledním obsazeným a prvním neobsazeným pásem). [1]

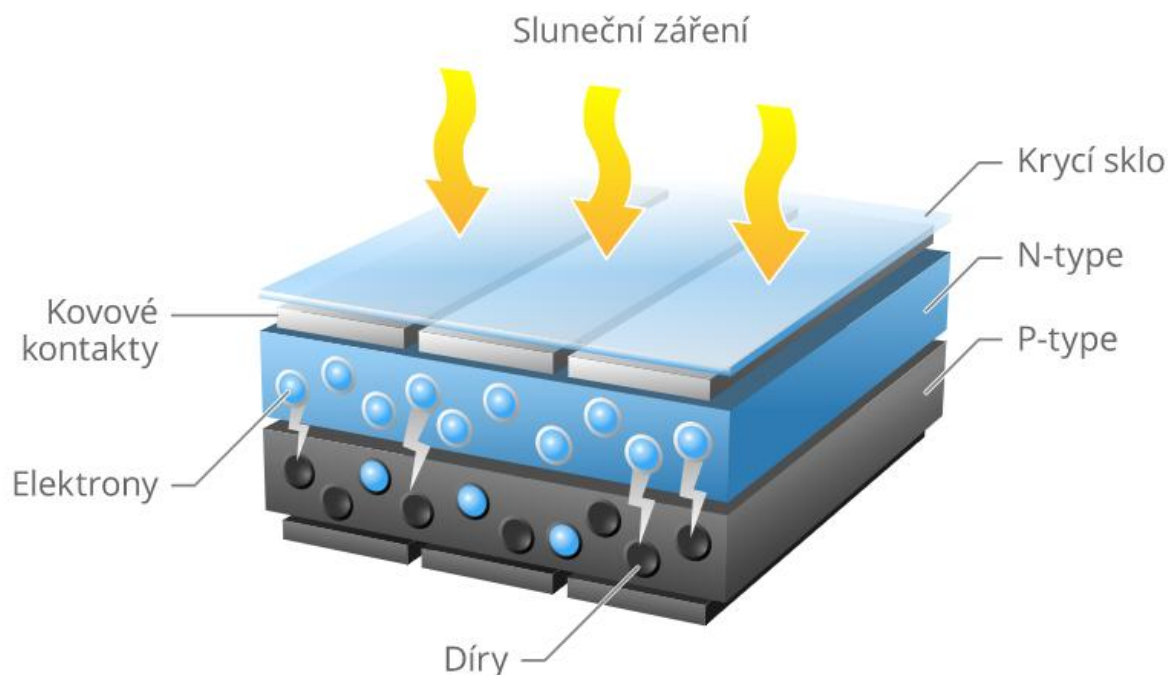
Malé množství elektronů má již při pokojové teplotě dostatečnou energii na to, aby se uvolnilo z vazeb a dostalo se do neobsazeného (vodivostního) pásu. Z toho vyplývá, že křemík v malé míře vede elektrický proud. Pro praktické využití křemíku ve fotovoltaických článcích se křemík musí určitým způsobem modifikovat přidáním malého množství jiných prvků. Jedná se o takzvané dopování. Jestliže je například do křemíku přidáno malé množství fosforu, či jiného prvku z 5. skupiny periodické soustavy, docílí se toho, že pátý elektron bude přebývat. Jelikož nemá v dosahu žádný

atom, se kterým by mohl vytvořit vazbu, tak se může po dodání malého množství energie mnohem snadněji uvolnit. Elektrická vodivost takto upraveného křemíku je výrazně větší než u čistého křemíku, díky přebytku záporných částic (elektronů). Takto dopovaný křemík se nazývá křemík typu N. [1]

Naopak pokud se do křemíku přidá bór, či jiný prvek z 3. skupiny periodické soustavy, který má ve válenční sféře jen tři elektrony, potom při vytvoření čtyř kovalentních vazeb bude na atomu bóru jeden elektron chybět a vznikne díra. Tato díra se chová jako kladná částice, která se může pohybovat po krystalu a vést elektrický proud. Takto modifikovaný křemík se nazývá křemík typu P. [1]

Zajímavá situace nastane, pokud se spojí krystal N a P polovodiče. Elektrony, které se volně pohybují, mají totiž tendenci vyrovnat svou koncentraci v celém spojeném krystalu. Proto přecházejí z části N do části P a v důsledku toho přebývají v části N kladné náboje a v části P záporné náboje. Elektrické pole, které vzniká v důsledku tohoto rozložení náboje, ovšem zase přitahuje elektrony zpátky, a tak se ustaví mezi těmito dvěma protichůdnými silami rovnováha a na rozhraní vznikne gradient koncentrace elektronů. Toto rozhraní se nazývá PN přechod. Důležitou vlastností tohoto přechodu je to, že umožňuje pohyb elektronů jen v jednom směru, a to z N do P. [1]

Základním prvkem fotovoltaického článku je velkoplošný PN přechod, který je orientovaný kolmo na plochu článku. Jestliže na článek dopadne sluneční záření (proud fotonů) o dostatečně velké energii, dojde k uvolnění elektronů a vzniku stejného množství děr. Elektrony jsou elektrickým polem PN přechodu přetahovány z N polovodiče do P polovodiče. Pomocí vhodných kontaktů, které jsou připevněny na obou stranách PN přechodu, může být takto vzniklý proud vyveden z fotovoltaického článku. Aby foton dokázal uvolnit elektron, musí mít větší energii, než je šířka takzvaného zakázaného pásma. Pro křemík, který má šířku zakázaného pásma přibližně 1,1 eV, to znamená, že záření musí mít vlnovou délku kratší než 1 000 nm. Jedná se tedy o část infračerveného záření a celou část viditelného slunečního záření. Ovšem z hlediska energetiky se využije pouze ta část energie fotonu, která se rovná šířce zakázaného pásma. Zbylá energie fotonu se přemění na kinetickou energii uvolněného elektronu a následně na teplo. Každý foton uvolní tímto způsobem právě jeden elektron a to bez ohledu na svou energii. Z toho důvodu závisí velikost proudu, který fotovoltaický článek vyprodukuje na intenzitě slunečního záření, tedy na počtu fotonů, které na článek dopadnou za jednotku času. Napětí na fotovoltaickém článku je závislé na intenzitě elektrického pole, které přesouvá elektrony. Tato intenzita je závislá především na šířce zakázaného pásma použitého polovodiče. Obecně je toto napětí poměrně malé. U křemíku je to asi 0,6 V a tato hodnota ještě při zatížení trochu poklesne. Udává se, že při maximálním výkonu je napětí asi 0,5 V. Aby bylo možné získat prakticky využitelnou velikost napětí, je nutné spojit řadu článků do série. Většinou se používají panely s 36 nebo 72 články, které dávají 18 nebo 36 V. Schéma principu fotovoltaického článku je na obr. č. 1. [1]



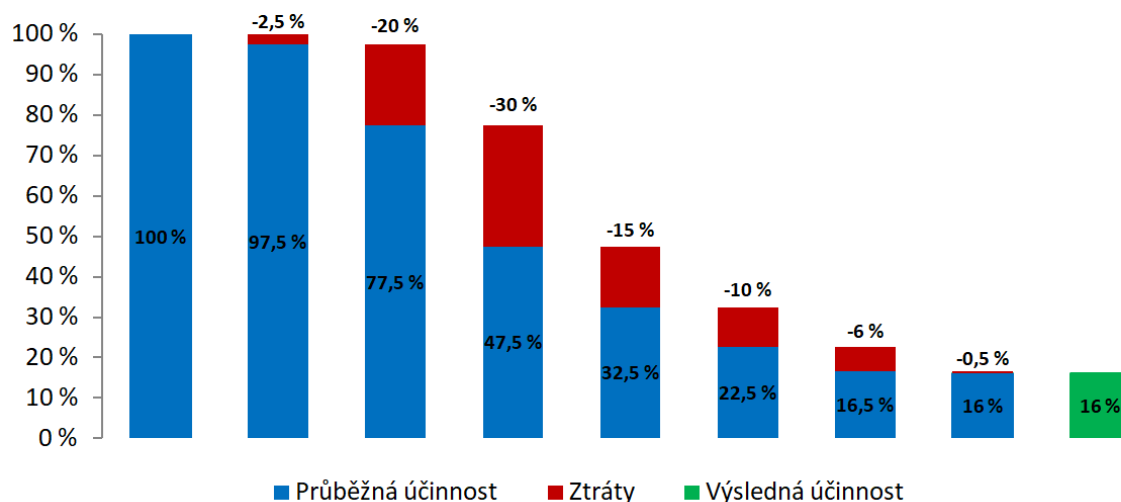
Obrázek č. 1 Princip fotovoltaického článku [24]

2.1 Základní princip fungování a konstrukce krystalického křemíkového fotovoltaického článku

Běžný krystalický křemíkový fotovoltaický článek je složen ze dvou různě dotovaných křemíkových vrstev. Vrstva, převážně dotována záporně (fosforem), je natočená směrem ke slunečním paprskům. Vrstva, nacházející se pod ní, je dotována kladně (bórem). Na přechodové vrstvě vzniká elektrické pole, které slouží k oddělení nábojů (elektronů a děr), uvolněných slunečním světlem. Aby mohl fotovoltaický článek odebírat proud, jsou na přední a zadní straně naneseny kovové kontakty, které se zpravidla nanášejí pomocí sítotiskové techniky. Na zadní straně je možné nanést kontaktní vrstvy po celé ploše pomocí hliníkové nebo stříbrné pasty. Naproti tomu přední strana musí co nejlépe propouštět světlo. Proto se zde kontakty obvykle nanášejí ve formě stromové struktury nebo tenké mřížky. Napařením nebo odloučením tenké antireflexní vrstvy z oxidu titaničitého nebo nitridu křemičitého lze snížit odrazivost světla na přední straně fotovoltaického článku. [3]

Po dopadu slunečních paprsků dochází k separaci nosičů nábojů a po připojení elektrického spotřebiče (žárovky) dojde k toku proudu. Na fotovoltaickém článku vznikají ztráty způsobené rekombinací, odrazem, zastíněním předních kontaktů atd. Velký podíl energie krátkovlnného a dlouhovlnného záření navíc nelze využít. Další část nevyužitá energie je absorbována a přeměněna na teplo. Pro tento příklad krystalického křemíkového fotovoltaického článku je v následujícím grafu na obr. č. 2 uvedena energetická bilance s jednotlivými podíly ztrát. [3]

Energetická bilance krystalického křemíkového FV článku



Obrázek č. 2 Graf energetické bilance krystalického křemíkového fotovoltaického článku [3]

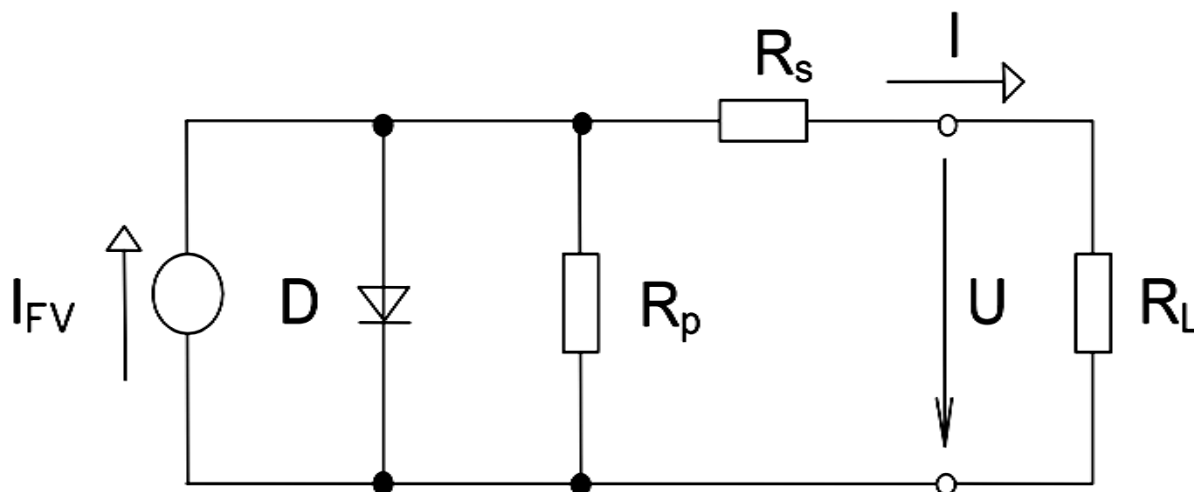
Tabulka č. 1 Energetická bilance krystalického křemíkového fotovoltaického článku [3]

100 %	Energie vyzářená sluncem
-2,5 %	Zastínění a reflexe předních kontaktů
-20 %	Příliš nízká energie fotonů dlouhovlnného záření
-30 %	Přebytečná energie fotonů krátkovlnného záření
-15 %	Rekombinace
-10 %	Spád potenciálu v článku, především v oblasti prostorového náboje
-6 %	Ztráty z činitele plnění (charakteristika)
-0,5 %	Tepelné proudové ztráty způsobeny sériovým odporem
16 %	Použitelná elektrická energie

3 Elektrické parametry fotovoltaických článků

3.1 Matematický model

Fotovoltaický článek je možné nahradit modelem, jehož schéma je znázorněno na obrázku č. 3.



Obrázek č. 3 Matematický model fotovoltaického článku [2]

Ozářená plocha A_{FV} přechodu PN generuje proud o hustotě J_{FV} . Oblast typu P se nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím dochází k propustné polarizaci a část proudu, který je generován, teče zpět diodou D . Pomocí paralelního odporu R_p jsou modelovány technologické nedokonalosti (mikrosvody) PN přechodu. Pomocí sériového odporu R_s je modelován vliv odporu materiálu a proudových sběrnic. Velikost výstupního napětí U na fotovoltaickém článku je rovna napětí na diodě U_D , snížena o úbytek napětí na sériovém odporu. [2]

Výstupní proud fotovoltaického článku lze na základě výše popsaného schématu vyjádřit následující rovnicí:

$$I = A_{FV} \cdot J_{FV} - I_{01} \left[\exp \left(e \cdot \frac{U + R_s I}{kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(e \cdot \frac{U + R_s I}{2kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p} \quad (1) \quad [2]$$

kde I ... je proud dodávaný fotovoltaickým článkem do zátěže (A)

U ... je napětí na svorkách fotovoltaického článku (V)

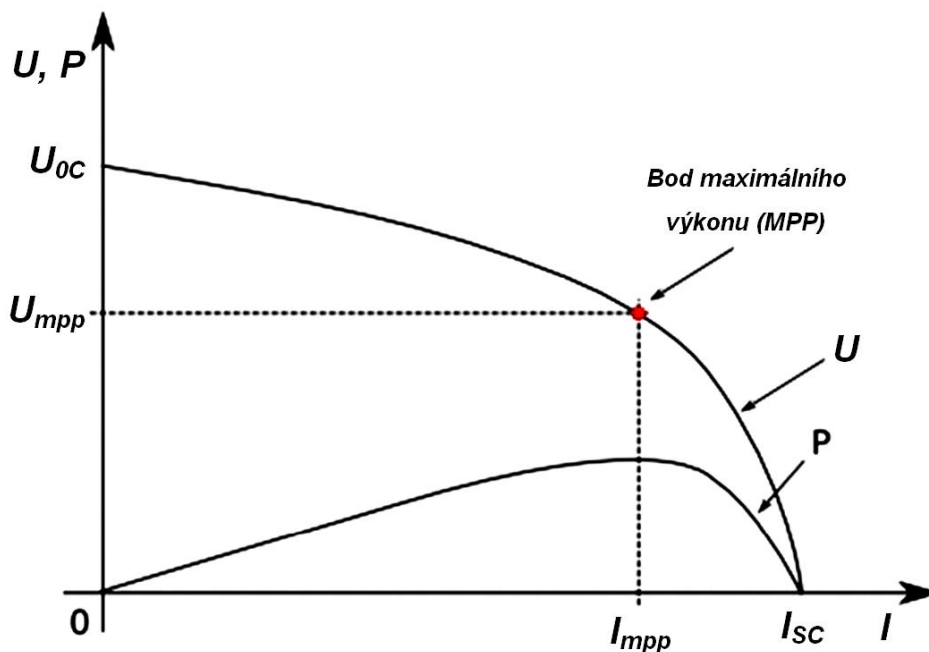
k ... je Boltzmannova konstanta

T ... je termodynamická teplota (K)

Z výše uvedené rovnice je patrné, že sériový odpor R_s má značný vliv na voltampérovou charakteristiku fotovoltaického článku. Sériový odpor snižuje velikost výstupního proudu, což způsobí i snížení celkové účinnosti článku. [2]

3.2 Voltampérová charakteristika

Jedná se o základní informaci o činnosti fotovoltaického článku, ze které lze vyčíst jeho základní veličiny. V-A charakteristika zobrazuje grafickou závislost proudu na napětí. Hraniční veličiny, nacházející se na této charakteristice, jsou proud nakrátko I_{SC} a napětí naprázdno U_{OC} . [2]



Obrázek č. 4 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [2]

3.3 Proud nakrátko – I_{SC}

Je to maximální proud, který je schopen fotovoltaický článek dodat při dané intenzitě ozáření, nulovém napětí a nulové hodnotě sériového odporu R_S . Jeho velikost je závislá na intenzitě ozáření, spektrální citlivosti, teplotě a ploše fotovoltaického článku. Pohybuje se řádově v desítkách mA až jednotkách A. [2] [14]

3.4 Napětí naprázdno – U_{OC}

Je to maximální napětí na výstupních svorkách fotovoltaického článku bez připojeného spotřebiče, tj. při nulovém proudu. Jedná se o maximální hodnotu napětí, získanou při dané intenzitě osvětlení a teplotě. Jeho velikost je velice závislá na teplotě a velikosti sériového odporu R_S . S rostoucí teplotou klesá a zároveň s ním klesá i napětí v bodě maximálního výkonu článku, což má za následek pokles maximálního výkonu, a tedy i účinnosti fotovoltaického článku. Napětí naprázdno nabývá hodnot jednotek až desítek V. [2] [8] [15]

3.5 Pracovní bod – PB

Jedná se o bod na voltampérové charakteristice, ve kterém fotovoltaický článek zrovna pracuje. Umístění pracovního bodu je závislé na vlastnostech spotřebiče. Ideální stav nastane, pokud se poloha pracovního bodu shoduje s polohou bodu maximálního výkonu MPP (Maximum Power

Point). Je-li poloha pracovního bodu v režimu nakrátko nebo naprázdno, nedodává článek žádný výkon. [14]

Poloha pracovního bodu je výrazně ovlivněna teplotou. Pokud na článek delší dobu dopadá sluneční záření s vysokou intenzitou nebo při zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), kdy teplota okolního vzduchu dosahuje teploty větší než 40 °C, dochází ke zvýšení teploty na povrchu článku až na 80 °C. To má za následek změnu jeho elektrických vlastností, která vede k poklesu svorkového napětí na zatěžovací charakteristice. Díky poklesu svorkového napětí se také sníží velikost výkonu, který je dodáván do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě, když na článek dopadá sluneční záření s největší intenzitou, může dojít až ke ztrátě 75 % dosažitelné denní výroby článku. [14]

3.6 Bod maximálního výkonu článku – *MPP*

Pro každý fotovoltaický článek existuje pracovní bod, ve kterém je schopen dodávat maximální výkon. Tento bod je nazýván jako bod maximálního výkonu článku (*MPP*), při napětí U_{mpp} a proudu I_{mpp} . Nachází se přibližně uprostřed ohybu voltampérové charakteristiky. V tomto bodě dochází k optimálnímu využití energie z dopadajícího slunečního záření. Proto by jej mělo zařízení, které z fotovoltaického článku odebírá energii, ideálně zatěžovat, aby článek pracoval v blízkém okolí tohoto bodu. [2] [15]

Výkon každého fotovoltaického článku je závislý na velikosti ozáření, na spektru světla a na teplotě článku. Pro výkon fotovoltaického článku lze tedy napsat rovnici:

$$P = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (2) \quad [2]$$

3.7 Činitel plnění (Fill factor – *FF*)

Udává poměr mezi maximálním výkonem v bodu *MPP* a maximálním výkonem, který je definovaný pomocí napětí naprázdno U_{0C} a proudu nakrátko I_{SC} . Lze tedy napsat rovnici:

$$FF = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{0C} \cdot I_{SC}} \quad (3) \quad [2]$$

3.8 Účinnost fotovoltaického článku – *EEF*

Je to podíl maximálního výkonu článku v bodu *MPP* a výkonu dopadajícího slunečního záření (P_{in}). Lze tedy napsat následující rovnici:

$$\eta = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{P_{in}} = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} \quad (4) \quad [2]$$

Účinnost je závislá na vlastnostech materiálu, ze kterých je fotovoltaický článek vyroben, na intenzitě dopadajícího záření a na velikosti sériového a paralelního odporu. Pokud je sériový odpor R_s malý, účinnost článků s rostoucí intenzitou záření poroste, než dosáhne svého maxima. K poklesu dochází až při dalším zvětšení intenzity záření. Pokud je sériový odpor velký, účinnost článků s rostoucí intenzitou záření klesá. K tomuto jevu dochází zejména u tenkovrstvých fotovoltaických článků. [2]

Všechny tyto výše uvedené parametry jsou vždy určovány za standardních testovacích podmínek, tzv. STC (Standard Test Condition). Sem patří testovací teplota $T = 25\text{ °C}$, intenzita slunečního záření $I_{rr} = 1\,000\text{ W/m}^2$ a definovaná vzduchová hmota (Air Mass) $AM = 1,5$. [2]

3.9 Sériový a paralelní odpor – R_s a R_p

Odvození sériového odporu R_s vychází z celkového odporu materiálu polovodiče a odporu kontaktů a propojení. Pokud je hodnota sériového odporu velká, má za následek, že při rostoucím proudu roste i úbytek napětí na R_s . Svorkové napětí článku, a tím i celková účinnost naopak klesá. V ideálním případě je hodnota sériového odporu rovna nule. [15]

Paralelní odpor zobrazuje defekty na krystalické mřížce, materiálové nedostatky, svodové proudy kolem okrajů článku a další závady. Velikost tohoto odporu by měla být vysoká, v ideálním případě je jeho hodnota rovna nekonečnu. Pokud by velikost paralelního odporu byla příliš nízká, znamená to, že je článek poškozen a chová se, jako by byl uvnitř zkratován. [15]

4 Generace fotovoltaických článků

4.1 První generace

Články této generace se prodávají již od sedmdesátých let a dodnes tvoří převážnou část trhu, a to přibližně 90 %. Jde o fotovoltaické články, vyráběné z desek monokrystalického křemíku, v nichž je vytvořen velkoplošný PN přechod. Charakterizují se velmi dobrou životností při zachování účinnosti, která se v sériové výrobě pohybuje od 14 % do 17 %. Články určené pro laboratorní účely mohou dosahovat účinnosti až 25 %. Nevýhodou je to, že pro výrobu je potřeba velké množství velmi čistého křemíku. [1] [2]

4.2 Druhá generace

Dochází zde ke snížení potřebného množství čistého křemíku, a tím i zlevnění výroby. Zároveň se začíná křemík nahrazovat jinými prvky. Nejčastěji se jedná o nahrazování polykrystalickým, mikrokystalickým a amorfním křemíkem s podstatně tenčí vrstvou oproti první generaci. Díky tomu dochází k úspoře hmotnosti a zlepšení mechanických vlastností, zejména pružnosti. Existují například fotovoltaické fólie, které se nalepí na plochu střechu, kde plní funkci nepropustné krytiny a zároveň vyrábí elektrickou energii. Velký zájem je i ze strany armády, která tyto články dokáže využít jako součást oblečení nebo batohů, a tím umožní napájet přenosná zařízení (mobilní telefon, vysílačku). Nevýhodou je účinnost článků (okolo 10 %), která je způsobena snížením množství křemíku. [1] [2]

4.3 Třetí generace

Jedná se o generaci, na které stále intenzivně probíhají výzkumné práce. Cílem je maximální využití energie dopadajících fotonů slunečního záření, nejčastěji ve formě několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Systémy třetí generace používají k oddělování nábojů jiné metody než PN přechod a často i jiné materiály než polovodiče. Například fotoelektrochemické (fotogalvanické) články nebo použití nanostruktur ve formě uhlíkových nanotyčinek, nanotrubiček nebo kvantových teček nanesených na vhodné podložky. Výhodou těchto struktur je možnost cíleného ovlivňování elektrických a optických vlastností pro nejefektivnější využití. [1] [2]

4.4 Čtvrtá generace

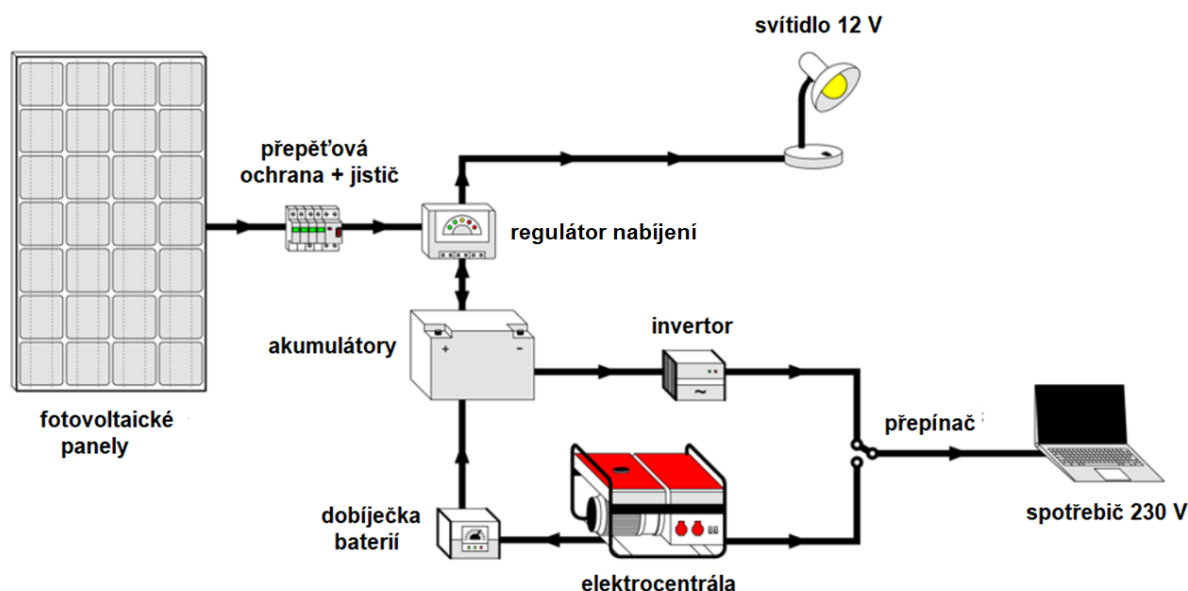
Je to poslední vývojový stupeň, do kterého spadají vícevrstvé profily, plně využívající široké sluneční spektrum. Vrstvení profilů je založeno na principu naladění každé vrstvy na určitý rozsah vlnových délek. Při dopadu slunečního záření na vrstvu, která ho nedokáže využít, dochází k propuštění záření do hlubších vrstev, které již dokážou toto záření přeměnit. [2]

5 Typy fotovoltaických systémů

5.1 Autonomní fotovoltaické systémy (Off-Grid)

Tyto systémy se nejčastěji využívají v místech, kde by nebylo možné, nebo by bylo příliš nákladné, zajistit dodávku elektrické energie z veřejné elektrorozvodné sítě, jako jsou například zahradní domky, odlehlé chaty, karavany, jachty atd. Skládají se z fotovoltaických panelů, akumulátorové baterie a ochranného obvodu, který má za úkol chránit akumulátorovou baterii před přebitím nebo nadměrným vybitím. Výkonnější systémy mohou obsahovat také napěťový inverter. [2] [13]

Systémy využívají speciálně upravené akumulátorové baterie, které jsou konstruované pro pomalé nabíjení i vybíjení. Optimální nabíjení a vybíjení akumulátorové baterie je zajištěné pomocí regulátoru dobíjení. K autonomnímu systému lze připojit spotřebiče, které jsou napájeny stejnosměrným proudem (napětí systému bývá obvykle 12 nebo 24 V), případně běžné síťové spotřebiče na 230 V, které jsou napájeny přes napěťový inverter. [2]



Obrázek č. 5 Autonomní fotovoltaický systém [37]

5.2 Hybridní fotovoltaické systémy

Jedná se v podstatě o kombinaci klasické síťové elektrárny (On-Grid) a autonomního systému (Off-Grid). Oproti On-Grid systémům (viz další kapitola) mají hybridní fotovoltaické systémy velkou výhodu. Jsou schopny využít maximální množství vyrobené energie v místě výroby, aniž by bylo zbytečně příliš mnoho energie dodáno do distribuční sítě. Vyrobenou energii využívají, ať už ve formě elektrické energie či přitápění, k ohřevu teplé užitkové vody, zavlažování, provozu bazény atd. [2]

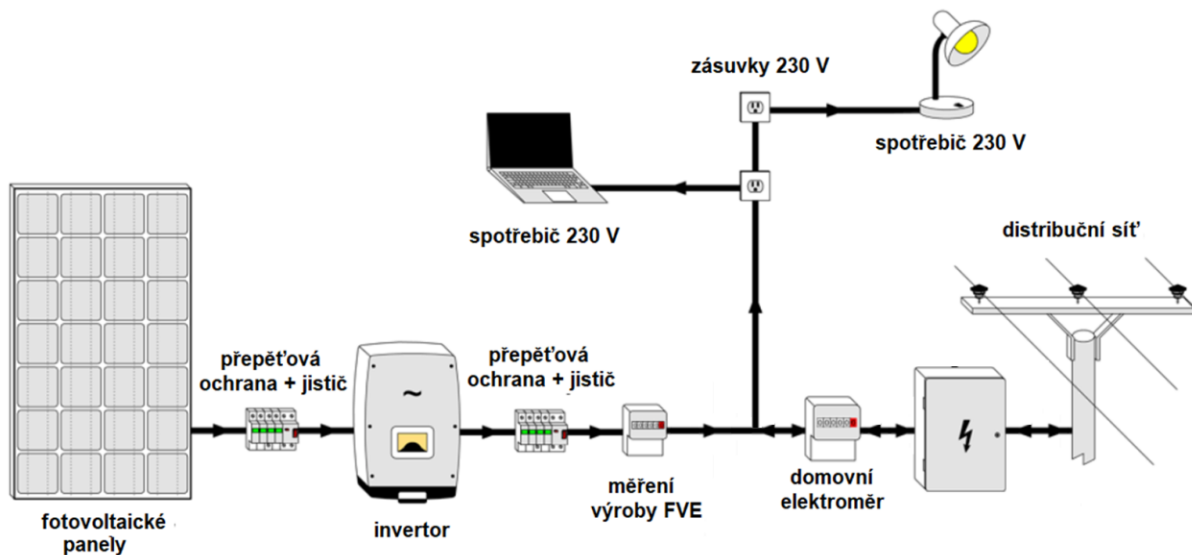
Další podstatnou výhodou hybridních fotovoltaických systémů je jejich integrovaná funkce pro využití přebytečné energie ve výkonových špičkách. Inteligentní hybridní inverter dnes již dokáže přesměrovat přebytečnou energii v reálném čase, či s nastaveným zpožděním do předem určených spotřebičů. [2]

5.3 Systémy připojené k elektrické síti (On-Grid)

Hlavní výhodou těchto On-Grid systémů je fakt, že veškerá vyrobená elektrická energie se na rozdíl od autonomního Off-Grid systému zužitkuje. Tyto systémy jsou většinou tvořeny větším počtem fotovoltaických panelů, invertorem, síťovými ochranami a zařízeními pro měření a regulaci. Systémy mohou být připojeny k elektrické síti ve dvou základních variantách, a to konkrétně v takzvaném „Zeleném tarifu“ nebo „Výkupním tarifu“. [2]

Zapojení v „Zeleném tarifu“

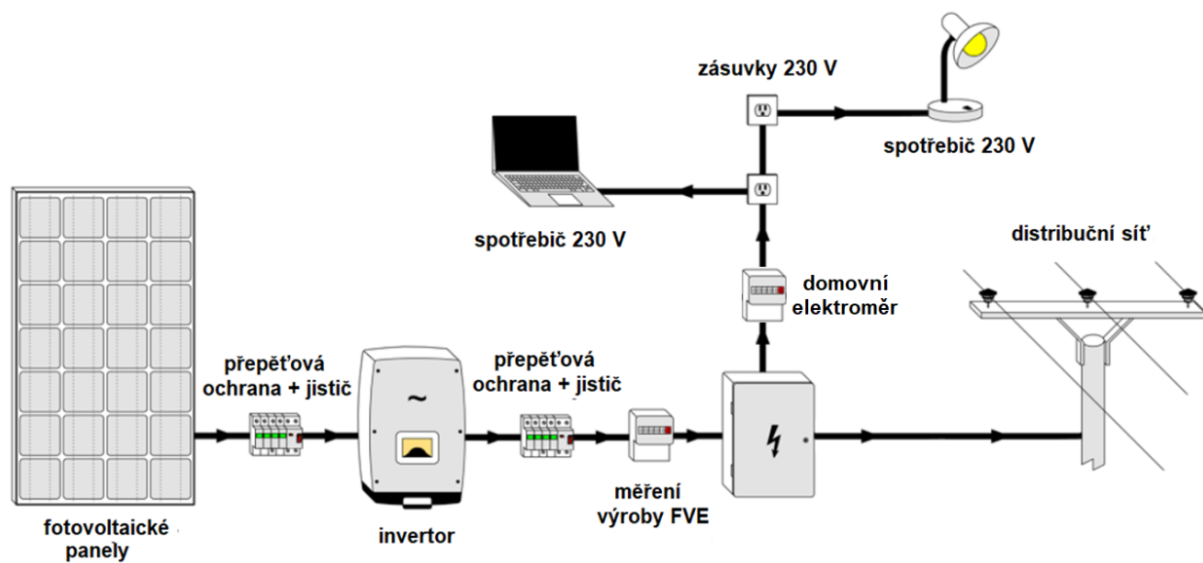
Za hlavní domovní skříní (HDS) je umístěn čtyřkvadrátový elektroměr. Za ním je následně napojený domovní rozvod a přes další elektroměr je napojena elektrárna. Toto zapojení se používá především v případech, kdy převážná část vyrobené elektrické energie je využita pro vlastní spotřebu objektu s instalovaným fotovoltaickým systémem. Přebytky vyrobené energie jsou prodávány a nedostatky dokupovány ze sítě. [2]



Obrázek č. 6 Fotovoltaický systém při zapojení v „Zeleném tarifu“ [37]

Zapojení ve „Výkupním tarifu“

V tomto případě je fotovoltaická elektrárna připojena mezi hlavní domovní skříní (HDS) a stávající elektroměr pomocí čtyřkvadrátového elektroměru. Toto zapojení se používá v případech, kdy se veškerá vyrobená elektrická energie dodává výrobcem do elektrizační soustavy a prodává se za výkupní ceny. [2]



Obrázek č. 7 Fotovoltaický systém při zapojení ve „Výkupním tarifu“ [37]

6 Prvky fotovoltaických systémů

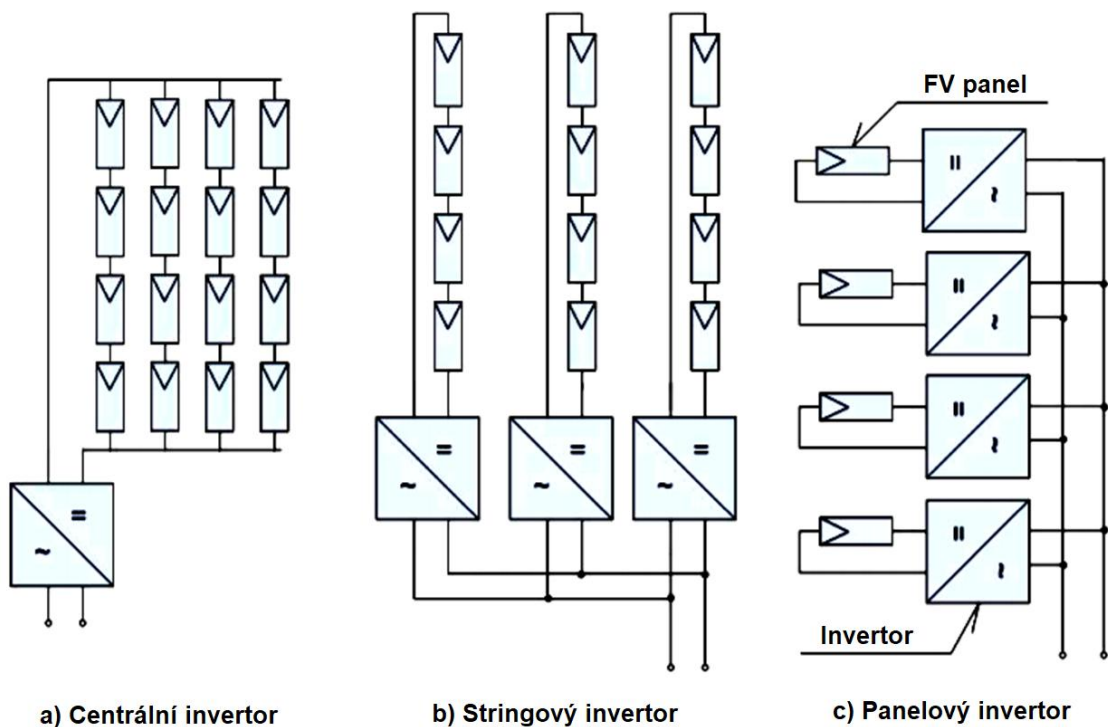
6.1 Invertor

Aby bylo možné fotovoltaický systém připojit do elektrické rozvodné sítě, musí se stejnosměrný proud generovaný fotovoltaickými panely přeměnit na proud střídavý s požadovanými parametry a kvalitou. Zařízení, které tuto přeměnu provádí, se nazývá měnič neboli tzv. invertor. [2] [3]

Invertor musí být schopen dodávat co nejvyšší výkon s minimem ztrát. To je možné docílit použitím zařízení pro sledování maximálního bodu výkonu (*MPP*), které je schopné změnou vstupního odporu zajistit optimální chod invertoru. Pokud je systém připojen paralelně k síti, je třeba splnit všechny požadavky na zajištění bezpečnosti provozu. Sem patří dodržování stanovených hodnot napětí, frekvence, impedance sítě, vypnutí dodávky při poruše, bezpečné odpojení, případně galvanické oddělení. To lze zajistit přímo pomocí invertoru, nebo pomocí dalších zařízení. Řada invertorů umožňuje připojení datové komunikační linky, pomocí které lze monitorovat chod fotovoltaického systému. [2] [3] [18]

Podle zapojení je lze ve fotovoltaickém systému rozdělit na:

- invertory panelové (invertor je připojen jen k jednomu fotovoltaickému panelu),
- invertory stringové nebo řetězcové (každý invertor je připojen k několika fotovoltaickým panelům, které jsou vzájemně sériově nebo paralelně propojeny),
- invertory centrální (ke každému invertoru jsou připojeny stovky až tisíce fotovoltaických panelů). [2]



Obrázek č. 8 Rozdělení invertorů dle zapojení [2]

6.2 Akumulátorová baterie

Fotovoltaické systémy obvykle produkují nejvíce energie během poledních hodin, kdy je většina lidí mimo domov. Akumulátorová baterie slouží k uložení této nevyužité energie. Tím lze kompenzovat období bez dostatečného slunečního záření například v noci nebo za oblačného počasí. [7] [19]



Obrázek č. 9 Akumulátorová baterie [25]

6.3 Regulátor nabíjení

Regulátor odebírá část generované elektrické energie z fotovoltaického systému a používá ji k nabíjení baterií. Musí být schopen regulovat generované napětí a proud tak, aby se baterie správně nabíly. Elektrická energie vyprodukovaná fotovoltaickými panely je závislá na dopadající sluneční energii. Pokud by v systému nebyl přítomen regulátor nabíjení, mohlo by dojít k přeplnění baterií, a tím i k jejich poškození. Schéma systému se zapojeným regulátorem nabíjení je zobrazeno výše na obrázku č. 5. [7] [19]



Obrázek č. 10 Regulátor nabíjení [27]

6.4 Nosné konstrukce

Mezi důležité části fotovoltaických systémů patří bezesporu i nosné konstrukce pro panely. Podle typu instalace je možné konstrukce rozdělit na:

- *Konstrukce pro sedlové střechy*
 - o Tato konstrukce se používá u malých systémů, které se upevňují na rodinné domy se sedlovou střechou, jejíž sklon je přibližně 35°. Nosný prvek pro připevnění fotovoltaických panelů tvoří hliníkové profily, které jsou přichycené speciálními háky ke konstrukci střechy. Výhodami této konstrukce jsou její jednoduchost, snadná montáž a nízká pořizovací cena. [2]
- *Konstrukce pro ploché střechy*
 - o Základ této konstrukce obvykle tvoří ocelové pozinkované profily trojúhelníkového tvaru. Ty jsou vzájemně „zavětrované“ a podélně spojené pomocí hliníkového profilu, který slouží pro uchycení fotovoltaických panelů. Připevnění této konstrukce ke střeše je realizováno buď napevno chemickými kotvami, nebo se zatíží dlaždicemi či betonovými bloky. [2]
- *Konstrukce pro volná prostranství*
 - o U větších fotovoltaických systémů, které jsou postaveny na volných prostranstvích, se využívá stejné řešení jako u plochých střech. Rozdíl spočívá pouze v tom, že se konstrukce spojuje pevně se zemí. Toto spojení se provádí závrtnými šrouby, pozinkovanými profily zatlačenými do země nebo betonovými základy. [2]
- *Polohovatelné systémy*
 - o V tomto případě jsou panely uchyceny k pohyblivé konstrukci. Jedná se o tzv. trackery, které umožňují automatické otáčení a naklánění panelů směrem ke slunci dle jeho aktuální polohy. Tím zajišťují kolmý dopad paprsků na panely, čímž dochází k maximálnímu využití sluneční energie. Oproti běžným pevným

instalacím dochází k nárůstu výtečnosti přibližně o 30-35 %. Mezi nevýhody těchto systémů patří velké počáteční investiční náklady, náklady na vlastní spotřebu systémů a nutnost údržby. [2]

6.5 Jistící a spínací prvky

Nutnost jištění fotovoltaických systémů pojistkami nebo DC jističi se odvíjí od počtu stringů, které jsou paralelně připojeny ke vstupu invertoru. [20]

Pokud se fotovoltaický systém skládá pouze z jednoho samostatného stringu, není nutné používat jištění, protože neexistují žádné vnější zdroje proudu, které by mohly fotovoltaické panely a jejich vedení poškodit. Systém, který je složený ze dvou paralelně připojených stringů, není schopen generovat dostatečně velký poruchový proud, který by poškodil panely nebo vedení. Proto není třeba ani tento systém jistit. [20]

V případě, že se fotovoltaický systém skládá ze tří a více paralelně zapojených stringů, musí být každý string chráněn. V případě poruchy v jednom stringu ostatní neporušené stringy stále generují proud. Součet generovaných proudů by mohl přesáhnout hodnotu, na kterou jsou fotovoltaické panely a kabelová vedení dimenzovány. Tím může dojít k jejich trvalému poškození. [20]

Nezbytné je také správné dimenzování jištění připojených spotřebičů a samotného invertoru. Důležitou částí celého systému jsou také vhodně dimenzované spínací prvky, které slouží k odpojení systému nebo jeho části při opravě nebo manipulaci. [15]

6.6 Kabelová vedení

Elektrická instalace fotovoltaických systémů musí obsahovat pouze takové vedení a kabely, které splňují požadavky příslušného aplikačního případu. Vedení se rozlišují na panelové, popřípadě stringové, hlavní stejnosměrné a připojovací střídavé vedení. [3]

- *Vedení panelů a řetězců*
 - Spojovací vedení, které slouží k propojení jednotlivých panelů fotovoltaického systému a vedení k rozváděči generátoru, se označuje jako panelové, případně stringové. Instalace tohoto vedení bývá většinou ve venkovním prostředí. Aby byla pokládka odolná vůči zemi a zkratu, nesmí být kladný a záporný pól veden v rámci jednoho společného vedení. V praxi se osvědčilo použití jednožilových kabelů s dvojitou izolací, které zajišťují vysokou bezpečnost. Izolace těchto kabelů musí být schopna odolávat klimatickým vlivům a vlivům UV záření. [3] [15]
- *Hlavní stejnosměrné vedení (DC)*
 - Toto vedení slouží ke spojení rozváděče generátoru s invertorem. Výše uvedené typy vedení lze použít také pro hlavní stejnosměrné vedení, často se však z ekonomických důvodů používá obvyklé vedení s pláštěm z PVC s označením NYM nebo NYY. Pokud se PVC vedení nachází ve venkovním prostoru, musí být uloženo v ochranné trubce, protože není odolné vůči UV záření. V případě

fotovoltaického systému, který je ohrožen blesky, by se mělo použít stíněné vedení. [3]

- *Připojovací střídavé vedení (AC)*
 - Toto připojovací vedení slouží k propojení invertoru s rozvodnou sítí, přes ochranné zařízení. U třífázových inverterů je přípojka k síti nízkého napětí realizována pěti-žilovým vedením. V případě jednofázových inverterů se používá tři-žilové vedení. Použité kabely jsou obvykle typu NYM, NYY nebo NYCWY. [3]
- *Připojovací technika*
 - Připojení panelových a ostatních DC vedení by se mělo provést velice pečlivě. V případě špatného připojení kontaktů může dojít k tvorbě elektrických oblouků, což zvyšuje riziko vzniku požáru. Obvykle se připojení realizuje pomocí šroubové svorky, šroubového spoje, tažné pružinové svorky nebo pomocí konektoru. [3]
- *Instalační materiál*
 - Instalace vedení by se měla realizovat s vhodným upevňovacím materiálem. Instalační materiál, použitý pro venkovní prostředí, by měl být odolný vůči povětrnostním podmínkám. Upevnění je možné provést pomocí PG ochranné trubky, žebrové trubky, kabelového kanálu, kabelové spojky, kabelové spony nebo přibíjecí spony. [3]

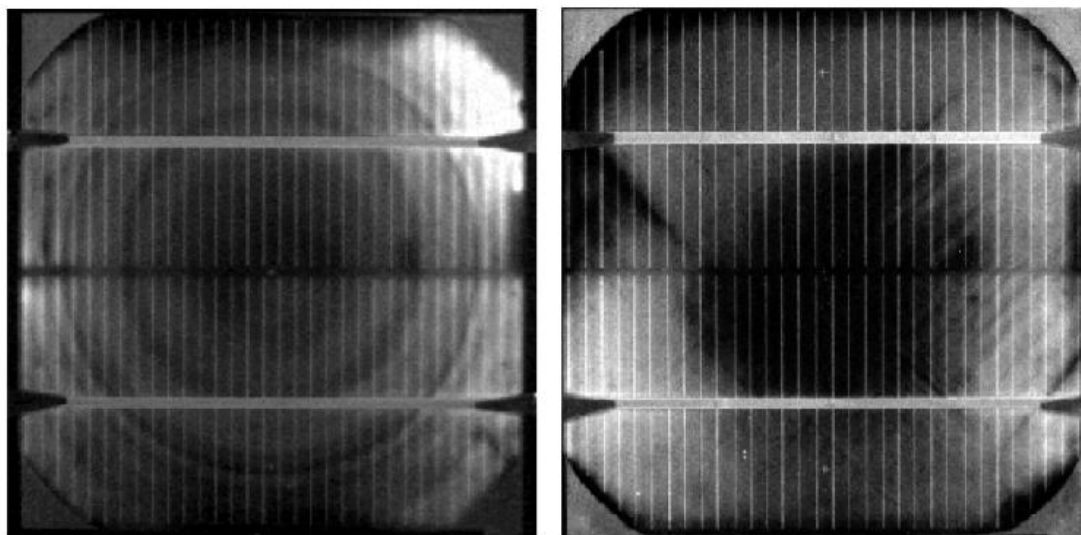
7 Účinnost fotovoltaických systémů

7.1 Defekty fotovoltaických článků

Defekty fotovoltaických článků lze podle jejich vzniku rozdělit do dvou základních skupin, kterými jsou materiálové a procesní defekty.

Materiálové defekty (Grow Defects)

- *Vírový defekt (tzv. Swirl Defect)*
 - Název defektu je odvozen od jeho tvaru, který je obvykle tvořen soustřednými kružnicemi. Tyto kružnice vznikají při injekci příměsí, zejména kyslíku, během výroby křemíkového ingotu. Přítomnost kyslíkových příměsí způsobuje rekombinaci volných elektronů, čímž dochází ke snížení účinnosti celého článku. [22] [28]
- *Vnitřní pnutí materiálu*
 - Pnutí materiálu je způsobeno špatně řízeným procesem výroby monokrystalického křemíku, který se nejčastěji provádí pomocí Czochralského metody. [22] [28]

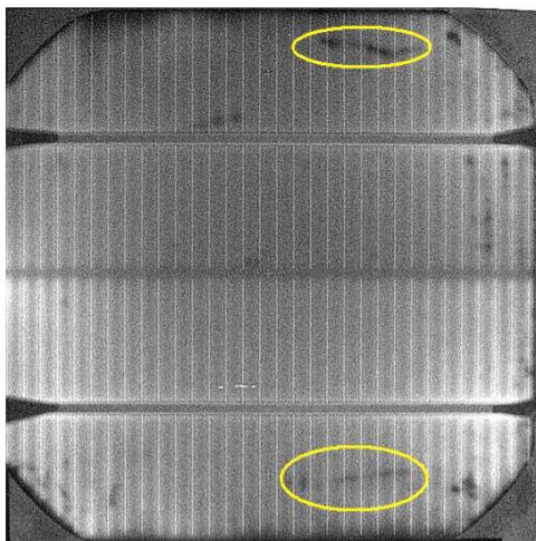


Obrázek č. 11 Vírový defekt a vnitřní pnutí materiálu [28]

Procesní defekty (Processing Induced Defects)

Ke vzniku procesních defektů dochází při technologickém zpracování křemíku pro výrobu článků. Vznik těchto defektů způsobuje zhoršení elektrických vlastností fotovoltaických článků. Mezi základní procesní defekty lze zařadit:

- *Mechanická poškození*
 - Tato poškození patří mezi nejčastější. Příčinou bývá špatná manipulace s fotovoltaickým článkem například během výroby, při zasouvání jednotlivých článků do zásobníku nebo při jeho manipulaci během závěrečné diagnostiky. Mezi mechanická poškození lze zařadit například odštípnutí okraje článku, neobroušené hrany, které způsobují zkrat přední a zadní strany. Dále nedokonalé provedení metalizace, které může být způsobeno špatnou technologií sítotisku, což má za následek špatný odvod proudu, generovaného fotovoltaickým článkem. Mezi další poškození lze zařadit skrytý lom, který způsobuje zhoršení elektrických vlastností a nemusí být na první pohled patrný, poškrábání, u kterého může dojít k narušení vrchní vrstvy fotovoltaického článku takovým způsobem, že dojde až k narušení PN přechodu, a tedy k mikroskopickému lavinovému průrazu. [22] [28]
- *Nehomogenita difuzní vrstvy*
 - Nehomogenita je způsobena vnikem nečistot během difuzního procesu. [22]

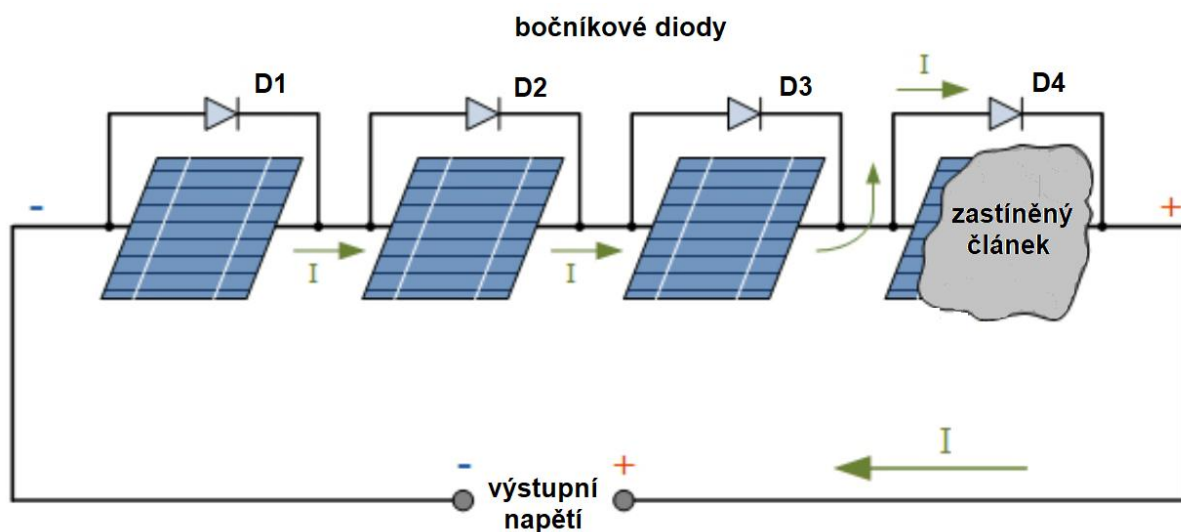


Obrázek č. 12 Nehomogenita difuzní vrstvy [28]

7.2 Defekty fotovoltaických panelů

Proražení bočníkové diody

Bočníkové neboli tzv. bypass diody, slouží k omezení vlivu zastínění, a tím i vzniku horkých míst, které jsou popsány níže. Tyto diody jsou obvykle antiparalelně zapojeny k 18 až 20 fotovoltaickým článkům. Jejich úkol spočívá v překlenutí a odpojení zastíněného segmentu panelu. [3]



Obrázek č. 13 Funkce bočnickových diod [39]

Bočnickové diody jsou obvykle umístěny v přípojovacích krabicích panelů, které jsou částečně zality silikonem. Někteří výrobci dnes již přecházejí na „pásy“, u kterých jsou diody zalaminovány přímo v panelu. Touto metodou je možné použít více diod než v případě umístění v přípojovací krabici. Tím se značně zmenší ztráty způsobené zastíněním. Nevýhodou je ovšem výměna vadných bočnickových diod. [3]

Poruchy bočnickových diod naštěstí nejsou příliš časté. Mezi nejčastější poruchy patří proražení diody, která se následně stane permanentně vodivou. To může být způsobeno nevhodným dimenzováním na zkratový proud, který způsobí nadměrné oteplení, a tím následnou destrukci diody. Další příčinou může být přepětí způsobené úderem blesku v okolí. Tyto poruchy mají velký vliv na výkon i životnost celého panelu. [3] [15]



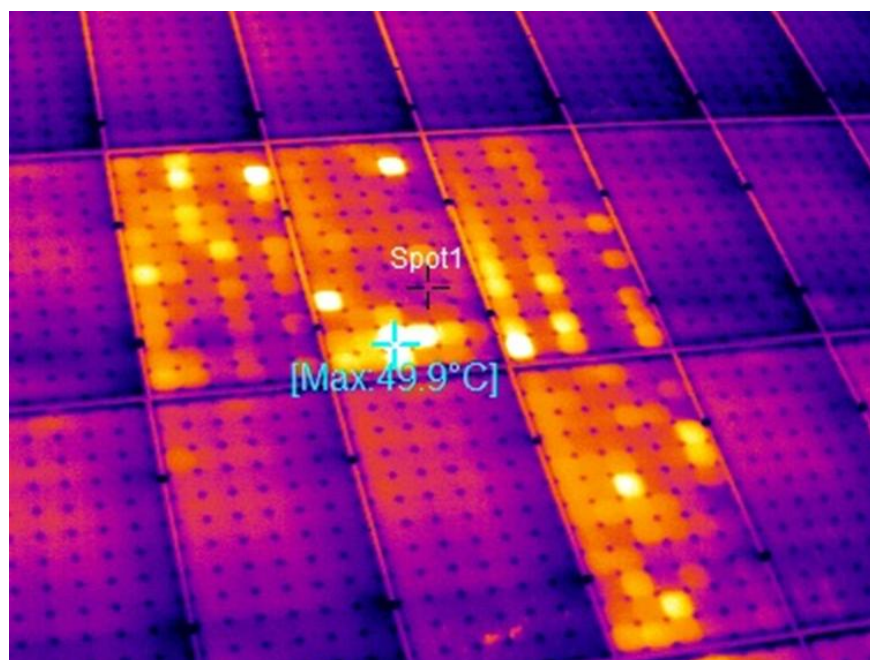
Obrázek č. 14 Přípojovací krabice pro bočnickové diody [41]

Horká místa (Hot spots)

Horká místa vznikají v případech, kdy dojde k nerovnoměrnému zastínění fotovoltaického panelu. To může například nastat, když na fotovoltaický panel spadne list, který zastíní jeden článek. Ostatní nezastíněné články stále vyrábějí elektrický proud, který protéká také zastíněným článkem. Zastíněný článek se tak stane spotřebičem a začne odebírat energii vyrobenou nezastíněnými články. Odběr energie způsobí jeho zahřívání, které může vést až k trvalému poškození článku. [3]

Mezi další příčiny vzniku horkých míst patří například mikrotrhliny v článku, které vznikly během výroby, přepravy, či montáže. [3]

Horká místa lze v počátku objevit například pomocí termokamery nebo pomocí elektroluminiscence (ELCD). V případě vyššího zahřívání lze horká místa zpozorovat pohmatem rukou, či vizuálně, kdy na zadní straně panelu vznikají hnědá místa. V dnešní době již většina výrobců používá bočníkové diody, které zastíněnou část překlenou a odpojí. [3]



Obrázek č. 15 Horká místa na fotovoltaických panelech [29]

Šnečí cesty (Snail trails)

Někdy se mohou na krystalických panelech objevit takzvané „šnečí cesty“. Jedná se o barevné změny na povrchu článku, které jsou viditelné pouhým okem. Tyto změny vypadají tak, jako by se na panelech nacházely stopy po šnečím slizu, což dalo tomuto jevu název. Ve skutečnosti jsou barevné změny způsobeny chemickými procesy, které probíhají na povrchu článku, ve spojení s pronikající vlhkostí, která proniká skrz fólii na zadní straně panelu. Změny barev se obvykle objevují na okrajích článku a podél mikrotrhlin. Vznik tohoto jevu a jeho vliv není zatím úplně vysvětlen z důvodu více příčin jeho vzniku. Vznik šnečích cest by mohl souviset například s použitými materiály v panelu nebo s přítomností mikrotrhlin v článcích. Negativní vlivy na panel, zejména snížení výkonu, dosud nebyly prokázány. Pravděpodobně jsou šnečí cesty pouze viditelné mikrotrhliny, které funkci panelu nijak neohrožují. [3]



Obrázek č. 16 Šnečí cesty [30]

Delaminace fotovoltaického panelu

K delaminaci dochází, pokud se spoj mezi zadními plasty (např. EVA fólie nebo licí pryskyřice) a čelním sklem začne uvolňovat. K uvolnění může dojít mechanickým poškozením nebo vlivem stárnutí. Následně vzniknou netěsnosti, skrze které do článků pronikají vzduch a vlhkost, což způsobuje vznik bublin nebo korozi článku. To vede k rychlejšímu stárnutí panelu, a tím i k poklesu výkonu a účinnosti. [3] [16]

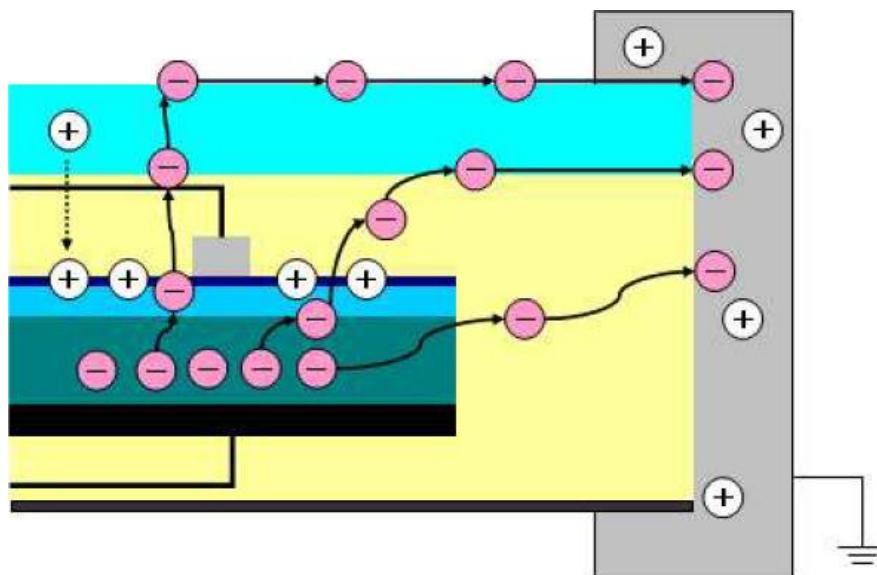


Obrázek č. 17 Delaminace fotovoltaického panelu [16]

Potenciální indukovaná degradace (PID)

Negativní působení PID se u fotovoltaických panelů vyskytuje v průměru po 2 až 4 letech provozu. V zásadě se jedná o mezivrstvou polarizaci, která může vést až k nevratné degeneraci křemíku ve fotovoltaických panelech, související s rozdílem potenciálů vůči zemi. PID vyvolává nepatřičnou změnu polarizace nábojů na fotovoltaických panelech, které jsou nejbližší zápornému pólu stringu. Hodnota potenciálu fotovoltaického článku se zde pohybuje mezi -250 V až -450 V,

v závislosti na délce daného stringu a typu používaného invertoru. Naopak rám fotovoltaického panelu má hodnotu potenciálu rovnu 0 V díky bezpečnostnímu uzemnění. Elektrické napětí mezi fotovoltaickými články a rámem může způsobit vznik svodových proudů tvořenými ionty, které jsou schopné procházet mezi polovodičovými materiály a dalšími prvky panelu (např. rám, konstrukce, sklo), což způsobí snížení výstupního výkonu. Pohyblivost iontů se zrychluje s rostoucí teplotou, vlhkostí a napěťovým potenciálem. [17]



Obrázek č. 18 Potenciální indukovaná degradace [3]

Zároveň s rostoucím rozdílem potenciálu úměrně roste i riziko vzniku degradace křemíku, a tím i ztráta výkonnosti panelu. Riziko degradace a výsledný úbytek výkonu se zvyšuje v souvislosti s rostoucím počtem panelů zapojených ve stringu. Největší poškození vlivem PID je pozorovatelné u posledního panelu na záporném konci stringu. S delším působením PID poškození postupuje na další panely směrem ke kladnému stringu. [17]

Degradace FV článků dopadajícím zářením (LID)

Degradace zářením tzv. LID (Light induced degradation) se projevuje u fotovoltaických panelů, které jsou složeny ze standardních křemíkových fotovoltaických článků typu P. Je způsobena stopami kyslíku, obsaženým v roztaveném křemíku během Czochralského procesu. Působením světla se tento kyslík může rozptýlovat přes křemíkovou mřížku a vytvářet sloučeniny bóru a kyslíku. Sloučeniny bóru a kyslíku vytvářejí své vlastní energetické hladiny v křemíkové mřížce, které mohou absorbovat elektrony a díry. Ty se pak nemohou zúčastnit fotovoltaického procesu, a zhoršují tak elektrické vlastnosti celého článku. U fotovoltaických článků typu N, které jsou dopovány fosforem nebo arsenem, nedochází k degradaci dopadajícím zářením ani v případě vyššího obsahu kyslíku v základním materiálu. [21] [23]

7.3 Negativní vlivy ovlivňující účinnost fotovoltaických systémů

Sníh

V zimních měsících je účinnost fotovoltaických panelů značně ovlivňována sněhem. Pokud je celý panel pod sněhem, klesá jeho výkon na nulu. Aby k této situaci docházelo zcela minimálně, je

vrchní povrch fotovoltaického panelu tvořen hladkou vrstvou. Při umístění na šikmou střechu po něm sníh sklouzne a odkryje tak alespoň část panelu. Pokud na odkrytou část bude dopadat sluneční záření, začne se celý panel mírně zahřívat, a sníh se tak na hladké ploše většinou neudrží. [10]



Obrázek č. 19 Sněhová pokrývka na fotovoltaickém systému [38]

Zastínění

Zastínění může být způsobeno například sousedními stavbami, stromy, elektrickým vedením, ale také vzdálenými výškovými stavbami (panelovými domy, komíny, vysílači atd.). U stromu či keřů je třeba věnovat pozornost tomu, že stále rostou, a mohou tedy zařízení zastínit až za několik let. Venkovní elektrická vedení, která vedou nad zařízením, vrhají sice malé, ale účinné pohyblivé stíny, proto je třeba počítat i s nimi. U vyvýšených panelů, či u panelů na natáčecích modulech může docházet k takzvanému vlastnímu zastínění, které způsobují další panely nacházející se v blízkém okolí. Pomocí optimalizace sklonu a vzdáleností mezi jednotlivými řadami panelů lze minimalizovat toto zastínění, a tím i ztráty, které způsobuje. Výkonové ztráty, způsobené zastíněním, lze dále redukovat pomocí bočnickových diod, které byly popsány výše. [3]

Znečištění

Typ znečištění je značně ovlivněn umístěním fotovoltaických panelů. V České republice převládá znečištění způsobené ptačími exkrementy a spadáním listů. V suchých jižních oblastech způsobuje velkou část nečistot prach. Největší znečištění prachem lze očekávat v průmyslových oblastech a jejich blízkosti. Dalším znečišťovatelem se mohou stát zemědělské plochy a objekty například v období žní, kdy značně stoupá znečištění prachem. Také odvod vzduchu z dobytčích stájí nebo odpadního plynu z bio stanic může na panelech zanechat znečištění v podobě mazlavého filmu. [3]



Obrázek č. 20 Znečištění panelu [31]

Proti nečistotám funguje takzvané samočištění, což znamená uvolňování nečistot stékající dešťovou vodou. Samočištění je ovlivněno úhlem sklonu panelů. Dostatečného samočištění lze dosáhnout od úhlu sklonu 12° . Větší úhel sklonu zvyšuje rychlost stékající dešťové vody, a tím zlepšuje účinnost čištění. Na samočištění panelů má vliv také jejich konstrukce. U rámových panelů se může vytvořit okraj nečistot, který bude s časem stále narůstat. Tomu lze zamezit například použitím bezrámových panelů. [3]

Všeobecně se na normálním stanovišti při dostatečném sklonu panelů udávají ztráty způsobené znečištěním okolo 2 až 5 %. U zařízení, která jsou postižena silným znečištěním, lze pomocí pravidelného čištění značně zvýšit jejich účinnost. Čištění lze provádět ručně nebo pomocí speciálních přístrojů. Je třeba dbát na to, aby se čištění provádělo vodou s malým obsahem vápníku při obdobné teplotě, jakou mají panely. [3]

Orientace a sklon panelů

Důležitý faktor, který ovlivňuje výrobu elektrické energie z fotovoltaických panelů, je jejich sklon a orientace. V rámci České republiky se uvádí optimální sklon 35° s orientací na jih. Při montáži fotovoltaických panelů v jiném než optimálním sklonu, dochází k předpokládanému snížení výroby elektrické energie. Pro maximální zachycení slunečního záření musí být použita pohyblivá konstrukce (tzv. tracker), která je rozebrána níže. [11] [12]

Optimální orientace je na jih, přičemž odchylka k jihozápadu je výhodnější než k jihovýchodu. To je způsobeno tím, že během dopoledne je obvykle větší oblačnost, takže dopadající energie je menší. Z měření, které bylo provedeno na FSV ČVUT v Praze, vyplývá, že při dlouhodobějším srovnání produkce jihovýchodně a jihozápadně orientovaných panelů lze vidět, že panely natočené na jihozápad mají většinu roku vyšší produkci než panely natočené na jihovýchod. Vyšší nebo stejná produkce u panelů natočených na jihovýchod je pouze během letních měsíců. To je způsobeno tím, že v odpoledních hodinách má venkovní vzduch vyšší teplotu, tudíž se účinnost jihozápadních panelů snižuje. Z celoročního srovnání pak vyplývá, že panely orientované na jihozápad mají o 5 až 7 % vyšší produkci než ty, které jsou orientovány na jihovýchod. [12]

Špatně dimenzovaná kabeláž

Při výstavbě fotovoltaického systému je třeba dbát na správné dimenzování průřezu kabelů pro stejnosměrný rozvod. V případě špatného dimenzování průřezu dochází k výkonovým ztrátám a nadměrnému zahřívání. [15]

V případě střídavého rozvodu je nutné také dbát na správné dimenzování průřezu, vzhledem k přenášenému výkonu a délce vedení. Pokud jsou kabely nedostatečně dimenzovány, dochází nejen k výkonovým ztrátám a nadměrnému zahřívání, ale také ke vzniku velkého úbytku napětí. [15]

7.4 Další možnosti navýšení účinnosti fotovoltaických systémů

Antireflexní vrstvy a textura povrchu

Zvýšení účinnosti lze dosáhnout zvětšením intenzity záření, které na fotovoltaický panel dopadne a je jím pohlceno. Materiál používaný pro výrobu fotovoltaických panelů má poměrně velký index lomu, tudíž dochází k částečnému odrazu dopadajícího slunečního záření. Účinnost je možné navýšit použitím dokonalejší antireflexní vrstvy, například vytvořením jehlanovité struktury na přední straně panelu. Tím je usnadněn vstup fotonů do struktury panelu a zároveň je díky totální reflexi znesnadněn výstup nezachycených fotonů, odražených od zadní strany panelu směrem ven. [1]

Průhledné kontakty

Kontakty na vrchní straně fotovoltaického panelu zastiňují určitou část dopadajícího záření, čímž je snížena celková účinnost. Tomu lze zabránit použitím průhledné elektricky vodivé vrstvy. Ta se zpravidla vyrábí z oxidu cínu. [1]

Oboustranné panely

Výrazného zvýšení účinnosti lze dosáhnout použitím oboustranných fotovoltaických panelů, u kterých světlo dopadá z obou stran. Pokud jsou panely namontovány například na bílé nebo stříbrné natřené střeše, je množství dopadajícího záření na zadní stranu velice významné. Těmito panely lze účinnost navýšit přibližně až o 30 %. [1]



Obrázek č. 21 Oboustranné fotovoltaické panely [32]

Natáčecí moduly

Jedná se o pohyblivé stojany (tzv. trackery), na kterých jsou namontovány fotovoltaické panely. Stojany jsou schopny sledovat polohu slunce a zajistit tak trvalý kolmý dopad paprsků na panely v průběhu dne. Jejich poloha se dá obvykle měnit v jedné nebo ve dvou osách. Změnu polohy lze provádět manuálně nebo automaticky. Sledování denního pohybu slunce po obloze bývá většinou řízeno automaticky pomocí počítače. Změna polohy dle výšky slunce nad obzorem v průběhu roku se několikrát ročně nastaví manuálně. [1]



Obrázek č. 22 Natáčecí moduly [33]

Koncentrátor záření

Jedná se o optické zařízení, které je schopné „sebrat“ sluneční záření z velké plochy, usměrnit ho na malou plochu fotovoltaického panelu, a tím tak výrazně zvýšit jeho výkon. Účinnost fotovoltaických panelů se obvykle při větším světelném toku zvyšuje. Díky tomu lze používat účinnější typy článků, které jsou pro běžné použití příliš drahé. Výhodou koncentrátoru je i jeho cena, která je obvykle značně menší než cena fotovoltaického panelu. [1]

8 Kontrola fotovoltaických systémů dle ČSN EN 62446-1

Měřicí přístroje, monitorovací zařízení a jejich metody použití pro diagnostiku se volí v souladu s IEC 61557 a IEC 61010. V případě použití jiných měřicích zařízení je nutné, aby splňovala parametry dané touto normou. Metody v této normě se uvádí pouze jako referenční. Lze použít i jiné metody, pokud poskytují stejně platné výsledky. [4]

Zkušební postupy:

Kontinuita ochranných vodičů pro vyrovnání potenciálu

Pokud jsou na stejnosměrné straně instalovány ochranná uzemnění a spojovací vodiče, musí se provést test elektrické kontinuity u všech těchto vodičů. Rovněž by mělo být ověřeno spojení s hlavním zemničem. [4]

Test polarity

Správná polarita všech stejnosměrných kabelů musí být ověřena pomocí vhodného zkušebního zařízení. Pokud je polarita kabelů ověřena, je zapotřebí zkontrolovat, zda jsou kabely správně označeny a připojeny do systémových zařízení (invertory, spínací zařízení atd.). [4]

Z bezpečnostních důvodů a v rámci prevence poškození připojených elektrických zařízení je nesmírně důležité provést kontrolu polarity ještě před ostatními testy a před sepnutím spínačů, nebo před vložením nadproudových ochran stringů. V případě, že jsou provedeny testy na již připojeném systému a je nalezena zpětná polarita některého stringu, pak je důležité zkontrolovat panely a bočníkové diody pro zjištění případné škody, způsobené touto chybou. [4]

Měření napětí naprázdno

Cílem tohoto měření je zjištění, zda jsou všechny panely ve stringu správně zapojeny. Chybné připojení panelů například v opačné polaritě, nebo připojení špatného počtu panelů do stringu je poměrně běžná chyba, která se objevuje zejména u větších systémů, a právě pomocí měření napětí naprázdno lze tyto závady lehce identifikovat. [4]

Výsledné hodnoty změřeného napětí musí být posouzeny tak, aby se zjistilo, zda odpovídají očekávaným hodnotám jedním z následujících způsobů:

- Porovnáním s hodnotou odvozenou z datového listu panelu nebo z podrobného fotovoltaického modelu, který bere v úvahu typ a počet panelů.
- Změřením napětí U_{OC} na jednom panelu. Pro získání očekávané hodnoty stačí naměřenou hodnotu vynásobit počtem panelů ve stringu.
- U systémů, ve kterých se nachází více stringů o stejném počtu panelů, lze v případě stabilních hodnot slunečního ozáření změřené napětí vzájemně porovnat.
- U systémů, ve kterých se nachází více stringů o stejném počtu panelů, lze v případě nestabilních hodnot slunečního ozáření použít více měřicích přístrojů, přičemž jeden z nich bude u referenčního stringu. [4]

Očekávaná hodnota by se měla obvykle lišit maximálně do 10 %. [4]

Měření zkratového proudu (proudu nakrátko)

Zkratový proud by měl být na každém stringu měřen pomocí vhodného zkušebního přístroje. Vznik nebo přerušení zkratových proudů stringu je potenciálně nebezpečné, a proto musí být použit vhodný zkušební postup, který je popsán níže. [4]

Naměřené hodnoty proudů by měly být porovnány s hodnotou, která je udána v datovém listu panelu. U systémů, které se skládají z více identických stringů a zároveň se tam nachází stabilní podmínky ozáření, lze hodnoty proudů porovnávat mezi sebou. Tyto hodnoty musí být stejné (obvykle v rozmezí 10 % pro ustálené podmínky ozáření). [4]

Pro nestabilní podmínky ozáření mohou být použity tyto metody:

- Měření může být odloženo.
- Měření se provede za použití více přístrojů s tím, že jedno měření se provede na referenčním stringu.
- Čtení údajů na přístroji pro měření ozáření může být použito k seřízení čtených hodnot proudů. [4]

Postup zkratové zkoušky

Je potřeba zajistit, aby veškeré stringy byly odděleny jeden od druhého a také, aby spínací přístroje a odpojovací prostředky byly rozpojeny. [4]

Do měřeného stringu musí být přiveden krátkodobý zkratový proud. Toho lze dosáhnout jedním z následujících způsobů:

- Použitím měřicího přístroje s funkcí měření zkratového proudu (speciální FV měřicí přístroje).
- Zkratovacím kabelem připojeným přechodně na odpínač, který je již součástí obvodu stringu.
- Použitím „zkratovacího spínacího měřicího boxu“ – tj. zařízení dimenzované na přerušení zatížení, které může být přechodně vloženo do obvodu, aby vytvořilo spínaný zkrat. [4]

Měřicí zařízení musí mít větší rozsah, než je potenciální zkratový proud a napětí naprázdno. Používá-li se spínací zařízení nebo zkratovací kabel pro vytvoření zkratu, musí být i tato zařízení dimenzována na dané hodnoty. [4]

Zkratový proud může být měřen pomocí klešťového ampérmetru, ampérmetru zařazeného přímo do obvodu nebo pomocí měřicího zařízení s funkcí měření zkratového proudu. [4]

Provozní zkoušky FV stringu

Při zapnutém systému v normálním provozním režimu (při sledování bodu maximálního výkonu invertoru) je třeba měřit proud každého stringu. Ten je možné měřit pomocí klešťového ampérmetru o vhodném rozsahu, který je umístěný na kabel měřeného stringu. Další možností je měření pomocí ampérmetru, či proudových transformátorů integrovaných výrobcem do spínacích boxů nebo invertorů. [4]

Naměřené hodnoty proudů by měly být porovnány s hodnotou, která je udána v datovém listu panelu. U systémů, které se skládají z více identických stringů a zároveň se tam nacházejí stabilní podmínky ozáření, lze hodnoty proudů porovnávat mezi sebou. Tyto hodnoty musí být stejné (obvykle v rozmezí 10 % pro ustálené podmínky ozáření). [4]

Pro nestabilní podmínky ozáření mohou být použity tyto metody:

- Měření může být odloženo.
- Měření se provede za použití více přístrojů s tím, že jedno měření se provede na referenčním stringu.
- Čtení údajů na přístroji pro měření ozáření může být použito k seřízení čtených hodnot proudů.
- Měření se provede pomocí specializovaného měřicího přístroje (s měřením ozáření).
- Provede se měření I-V křivek. [4]

Funkční zkoušky

Musí být provedeny následující funkční zkoušky:

- Musí být vyzkoušeny všechny spínací přístroje a jiné ovládací zařízení, aby zajistily správnou funkci. Dále se musí ověřit jejich správnost zapojení a namontování.
- Všechny invertory, které se ve fotovoltaickém systému nacházejí, musí být zkoušeny tak, aby zajistily správnou funkci. Zkušební postup by měl být uveden výrobcem invertoru. [4]

Funkční zkoušky, které vyžadují přítomnost napájení střídavého proudu (např. zkoušky invertoru), lze provést, jakmile se otestují střídavé strany systému. [4]

Zkouška izolačního odporu fotovoltaického systému

DC obvody fotovoltaického systému jsou během denního světla živé a na rozdíl od obvyklých AC obvodů nemohou být předtím, než se provede zkouška, odpojeny. [4]

Provedení této zkoušky představuje potenciální nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Proto je důležité plně porozumět postupu zkoušky ještě před zahájením jakékoliv práce. Následující základní bezpečnostní opatření by se měla dodržovat:

- Omezit přístup na místo provedení práce.
- Při provádění zkoušky se nedotýkat žádnou částí těla jakýchkoliv kovových povrchů a provést opatření, aby se tomuto dotyku zabránilo i u všech ostatních osob.
- Při provádění zkoušky se nedotýkat žádnou částí těla zadní strany panelu/laminátu nebo svorkovnic panelu/laminátu a provést opatření, aby se tomuto dotyku zabránilo i u všech ostatních osob.
- Je-li testovací přístroj na zkoušení izolace připojen, je třeba dbát na to, že zkušební pracoviště je pod napětím.
- Zařízení musí obsahovat funkci automatického vybíjení.
- Při provádění zkoušky je nutno mít a používat ochranné oděvy a vybavení. [4]

Pokud jsou výsledky zkoušky sporné, nebo pokud jsou závady způsobeny instalací, či je podezření na výrobní vady, je vhodné provést zkoušku na mokřím systému, pomocí které je možné najít místo závady. [4]

Zkušební metody:

Zkouška by měla být prováděna minimálně na každém fotovoltaickém systému. V případě potřeby lze také testovat jednotlivé stringy. [4]

Zkušební metoda 1 – zkouška mezi záporným pólem a zemí, následována zkouškou mezi kladným pólem a zemí. [4]

Zkušební metoda 2 – zkouška mezi zemí a zkratovaným kladným a záporným pólem. [4]

Je-li nosná konstrukce/rám spojena se zemí, může být uzemnění provedeno k jakémukoliv vhodnému bodu spojenému se zemí nebo připojením k rámu systému (kde je použit rám systému, je třeba se ujistit, že existuje kontinuita celého kovového rámu). [4]

U systémů, u nichž není rám spojen se zemí (např. kde se jedná o instalaci třídy II), si pověřený technik může zvolit provedení dvou zkoušek:

- mezi kabely systému a zemí,
- mezi kabely systému a rámem. [4]

U systémů, které nemají přístupné vodivé části (např. FV střešní tašky), se zkouška provádí mezi kabely a uzemněním budovy. [4]

Postup zkoušky

Před zahájením zkoušky:

- Zamezit přístupu nepovolaným osobám.
- Odpojit fotovoltaický systém od invertoru (obvykle u odpínače systému).
- Odpojit jakékoliv zařízení, které by mohlo mít vliv na měření izolace (tj. přepětová ochrana) v přípojných nebo kombinovaných boxech. [4]

Pokud se používá zkratovací spínací box pro zkoušku metodou 2, měly by být vodiče předtím, než bude aktivován zkratový spínač, bezpečně zapojeny do zkratovacího zařízení. [4]

Měřicí přístroj musí být zapojen mezi zem a kabel systému tak, jak je to pro použitou metodu vhodné. Zkušební přívodky by měly být před započetím zkoušky zabezpečeny. [4]

Postup se provede dle návodů k přístroji, aby bylo zajištěno, že zkušební napětí odpovídá tabulce č. 2 a čtené údaje jsou v megaohmech. [4]

Před odstraněním kabelů nebo předtím, než dojde k dotyku jakýchkoliv vodivých částí systému, je potřeba zajistit, že bude systém bez napětí. [4]

Izolační odpor fotovoltaického systému do 10 kWp

U fotovoltaických systémů do 10 kWp se izolační odpor měří zkušebním napětím, které je uvedené v tabulce č. 2. Systém je v pořádku, pokud hodnota izolačního odporu odpovídá minimálním hodnotám, které jsou zde uvedené. [4]

Tabulka č. 2 Hodnoty testovacího napětí a minimálních izolačních odporů [4]

Systémové napětí [U_{OC} (STC) x 1,25] (V)	Testovací napětí (V)	Minimální izolační odpor (M Ω)
<120	250	0,5
120-500	500	1
500-1 000	1 000	1
> 1 000	1 500	1

Měření I-V křivek

Měření I-V křivek může poskytnout následující informace:

- měření napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} ,
- měření maximálního napětí, proudu a výkonu v bodu MPP ,
- měření výkonu systému nebo stringu,
- měření panelu,
- měření činitele plnění stringu,
- identifikace vad systému nebo panelu,
- identifikace problému se zastíněním. [4]

Měření I-V křivek je přijatelnou alternativní metodou pro zjištění napětí naprázdno a proudu nakrátko. Pokud se tedy provádí měření I-V křivek, pak se samostatné měření napětí naprázdno a proudu nakrátko nemusí provádět. [4]

Měření výkonu systému nebo stringu

Vzhledem ke vhodným podmínkám ozáření poskytuje měření I-V křivek prostředky ke zjištění, zda fotovoltaický systém nebo string dosahuje jmenovitého výkonu. [4]

Měření výkonu fotovoltaického systému nebo stringu se provádí při stabilním ozáření o hodnotě nejméně 400 W/m², které je měřené v rovině panelů. [4]

Postup měření I-V křivek:

- Zajistit vypnutí systému a ověřit, že jím neteče žádný proud.
- Testovaný string izolovat a připojit k měřicímu přístroji.
- Nastavit vlastnosti, typ a množství panelů na měřicím přístroji.
- Měřič ozáření spojený s měřicím přístrojem namontovat tak, aby byl natočen vůči slunci ve stejném úhlu jako panely v měřeném obvodu a zajistit, aby nebyl zastíněn.
- Pokud je použita teplotní sonda, musí být v pevném kontaktu se zadní částí fotovoltaického panelu.
- Před zahájením měření zkontrolovat úroveň ozáření, aby bylo zajištěno, že hodnota ozáření v rovině systému je větší než 400 W/m². [4]

Tvar I-V křivek může poskytnout cenné informace o testovaném systému. Mezi tyto informace patří:

- poškození článku nebo panelu,
- poškození bočníkové diody,
- lokální zastínění,
- nesoulad panelu,
- velký sériový odpor,
- přítomnost zkratového odporu v článcích, panelech nebo systémech. [4]

9 Faktory způsobující chyby měření

Měření napětí a proudů

Přesnost měření elektrických parametrů je obvykle vysoká. Většina měřicích přístrojů měří hodnoty napětí a proudů se základní chybou menší než 2 %. [5]

Měření I-V křivek

Měření napětí a proudů pro I-V křivky je kvůli krátké době měření velice náročné. Je obtížnější dosáhnout podobné přesnosti jako u standardních měření. Měření může být navíc narušeno vlivem kapacit a indukčností fotovoltaického systému. Některé fotovoltaické panely mají vysokou hodnotu kapacity, která může způsobit zkreslení měřicích impulsů, což může vést k velké chybě měření. Tato chyba může být mnohem vyšší než deklarovaná základní přesnost. [5]

Měření izolačního odporu

Maximální provozní chyba podle IEC je 30 %. Většina moderních testerů má však mnohem vyšší přesnost. [5]

Chyba při výpočtu STC hodnoty

Při výpočtu STC hodnot dochází k dalším chybám, které je třeba vzít v úvahu. Sem patří například chyba zadaných parametrů fotovoltaického panelu. Proto by měly být všechny parametry získány ze spolehlivého zdroje. Dále dochází k velkým chybám u přepočtu při malých hodnotách ozáření. Minimální doporučená hodnota ozáření je 600 W/m^2 , avšak pro přesnější výpočet by hodnota ozáření měla být co nejbližší hodnotě $1\,000 \text{ W/m}^2$. [5]

Chyba při měření ozáření

Hodnoty ozáření jsou nejvíce ovlivňující veličinou při výpočtu STC. Proto je velice důležité, aby měřicí článek pro snímání hodnot ozáření byl přesný a správně umístěn. [5]

Pro typický fotovoltaický panel platí:

- 10% chyba měření ozáření bude mít za následek přibližně 0,5% chybu U_{STC} a 11% chybu I_{STC} v bodě *MPP*.
- 5% chyba měření ozáření bude mít za následek přibližně 0,3% chybu U_{STC} a 5% chybu I_{STC} v bodě *MPP*. [5]

Sklon měřicího článku musí být stejný jako u fotovoltaického panelu. Platí, že:

- Rozdíl 10° bude mít za následek přibližně 0,5% chybu U_{STC} a 10% chybu I_{STC} v bodě *MPP*. [5]

Chyba při měření teploty

Vliv chyby měření teploty je přibližně $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Přesnost teplotních senzorů je obvykle lepší než $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud by nebyl senzor na fotovoltaickém panelu správně umístěn, dojde k mnohem větší chybě měření. Snímač by měl mít dobrý tepelný kontakt s povrchem panelu. Všechny části vystavené vzduchu by měly být dobře izolovány. [5]

10 Popis použitých měřicích přístrojů

10.1 METREL Eurotest PV MI 3108

Pro měření v této práci byl použit měřicí přístroj od firmy METREL, a to konkrétně Eurotest PV MI 3108. Jedná se o profesionální přenosný multifunkční přístroj, určený pro měření a revize AC elektrických instalací nízkého napětí a DC fotovoltaických systémů.

Na AC elektrických instalacích nízkého napětí lze pomocí přístroje měřit:

- napětí a kmitočet,
- proud pomocí kleští,
- sled fází,
- izolační odpor,
- zemní odpor,
- výkon, harmonické zkreslení, energie,
- spojitost (přechodové odpory),
- skutečnou impedanci sítě, zkratový proud, úbytek napětí,
- proudové chrániče (RCD),
- skutečnou impedanci smyčky a zkratový proud,
- skutečnou impedanci smyčky a skutečný proud za proudovým chráničem bez jeho vybavení.

Na fotovoltaických systémech lze pomocí přístroje měřit:

- napětí, proudy a výkony fotovoltaických systémů (invertor a fotovoltaické panely),
- výpočet účinnosti a STC hodnot,
- měření U_{OC} a I_{SC} ,
- parametry okolního prostředí: teplota, intenzita ozáření,
- I-V křivky,
- izolační odpory fotovoltaických systémů. [6]



Obrázek č. 23 Měřicí přístroj METREL Eurotest PV MI 3108 [35]

10.2 Příslušenství k přístroji MI 3108

Vzdálená jednotka PV Remote Unit A 1378

Jednotka slouží pro měření teploty a intenzity ozáření fotovoltaických panelů. Fotovoltaické panely jsou většinou umístěny na střeše objektu, ale připojovací konektory, na kterých se provádí měření, jsou obvykle v invertoru uvnitř objektu. Pomocí jednotky A 1378 lze měřit parametry okolí, zatímco na jiném místě bude zároveň probíhat měření elektrických parametrů pomocí přístroje MI 3108. Pokud se tento přístroj s jednotkou A 1378 časově synchronizuje, je možné po skončení měření snadno získat hodnoty intenzity ozáření a teploty, které byly změřené ve stejnou chvíli pro případné výpočty STC hodnot. Tato jednotka sama o sobě nedokáže změřit žádné veličiny, a proto je nutné k ní připojit další příslušenství, jako je například sonda pro měření teploty A 1400, či monokrystalický PV referenční článek pro měření intenzity ozáření A 1427.



Obrázek č. 24 Vzdálená jednotka A 1378 [35]

AC/DC proudové kleště A 1391

Slouží k měření AC a DC proudů, bez nutnosti rozpojení elektrického obvodu. Měření funguje na principu Hallovy sondy. Konektory na výstupu kleští se připojí přímo do přístroje MI 3108. Následně se ve správném směru upevní na měřený vodič.



Obrázek č. 25 AC/DC proudové kleště A 1391 [35]

AC proudové kleště A 1018

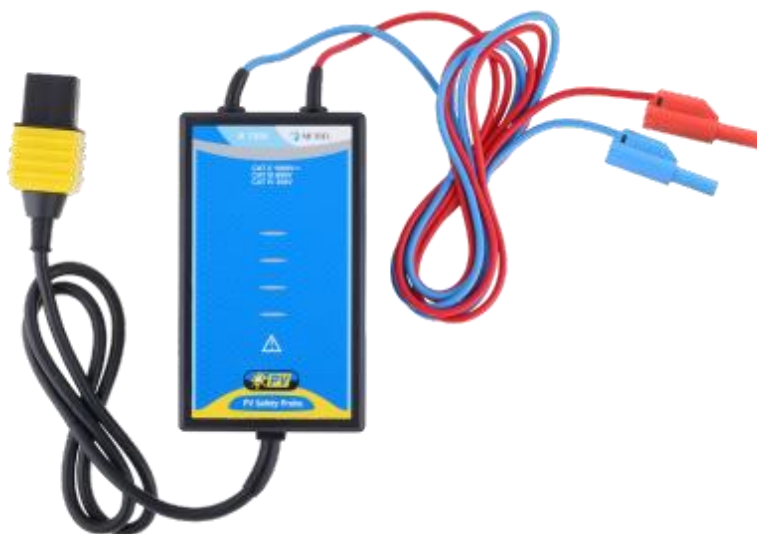
Jedná se o nízkorozsahové proudové kleště se zvýšenou citlivostí. Lze je použít k měření proudů, případně k měření zemních odporů v kombinaci s kleštěmi A 1019. Kleště jsou tvořeny plastovým obalem, ve kterém se nachází měřicí transformátor. Konektory na výstupu kleští se připojí přímo do přístroje MI 3108. Následně se ve správném směru upevní na měřený vodič.



Obrázek č. 26 AC proudové kleště A 1018 [34]

PV Bezpečnostní sonda A 1384

Bezpečnostní sonda slouží jako elektronická náhrada mechanického DC odpínače. Zapínání a vypínání sonda provádí automaticky, pomocí robustního vysokonapětového relé. Výhoda tohoto relé je v jeho jednoduchém připojení k měřicímu přístroji, bez nutnosti manuálního zapnutí, či vypnutí. Tato sonda také dokáže bezpečně odpojit fotovoltaický systém od instalace v případě vzniku trvalého zkratu. Použití bezpečnostní sondy je nutné například u měření U_{OC} a I_{SC} , izolačního odporu, I-V křivek atd. [5]



Obrázek č. 27 PV bezpečnostní sonda A 1384 [35]

Sonda pro měření teploty A 1400

Jedná se o teplotní sondu, která snímá teplotu fotovoltaického panelu. Tato sonda se upevní na zadní stranu fotovoltaického panelu pomocí kleští a její vývod se zapojí do vzdálené jednotky PV Remote Unit A 1378, či přes redukci přímo do přístroje MI 3108.



Obrázek č. 28 Sonda pro měření teploty A 1400 [35]

Monokrystalický PV referenční článek A 1427

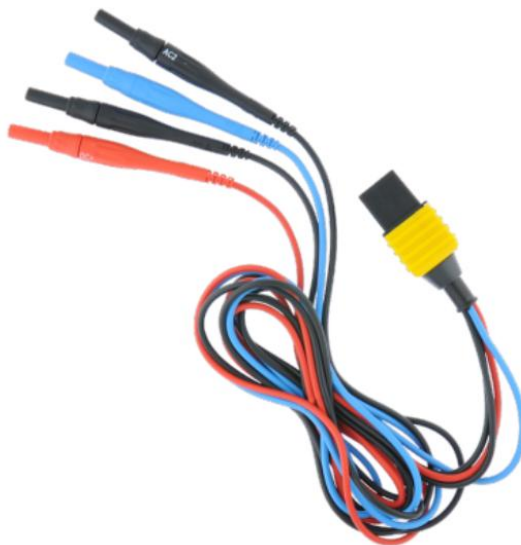
Článek snímá intenzitu slunečního ozáření, které dopadá na jeho plochu. Obvykle je upevněn pomocí kleští z boku na fotovoltaický panel, aby měl vůči slunci stejný úhel sklonu jako panel. Vývody z tohoto článku se zapojí do vzdálené jednotky PV Remote Unit A 1378, či přes redukci přímo do přístroje MI 3108.



Obrázek č. 29 Monokrystalický PV referenční článek A 1427 [35]

PV měřicí vodič A 1385

Tento vodič slouží pro měření účinnosti invertoru, kdy se AC i DC strana měří současně. Měření účinnosti invertoru lze realizovat i bez použití tohoto vodiče a to tak, že se nejdříve změří DC strana invertoru a následně AC strana. V tomto případě však může dojít k nepřesnostem v měření, které jsou způsobeny rozdílnými atmosférickými podmínkami (změna intenzity ozáření a teploty).



Obrázek č. 30 PV měřicí vodič A 1385 [35]

10.3 Termokamera

Pomocí termokamery lze provádět diagnostiku elektrických rozváděčů, výrobních strojů, motorů, fotovoltaických panelů atd. Konstrukčně se termokamera velice podobá klasickému fotoaparátu nebo kameře. Dopadající tepelné záření je pomocí objektivu promítnuto na tzv. detektor záření, na kterém dochází k měření jeho intenzity. Zjištěná informace je následně digitalizována a převedena na výsledný snímek, který se odborně nazývá termogram. [26]

Pro tuto práci byla konkrétně použita termokamera FLIR T420.



Obrázek č. 31 Termokamera FLIR T420 [36]

11 Popis měřeného fotovoltaického systému

Specifikace výroby:

- typ výroby: fotovoltaická s umístěním na střeše objektu,
- způsob provozu výroby: vlastní spotřeba (přebytky energie dodávány do distribuční sítě).

Technické údaje výroby:

- celkový instalovaný výkon: 29 900 W,
- rezervovaný výkon: 30 000 W,
- způsob připojení (počet fází) a rezervovaná hodnota jističe před elektroměrem: 3 x 63 A,
- vypínací charakteristika: B,
- napěťová hladina: 0,4 kV.

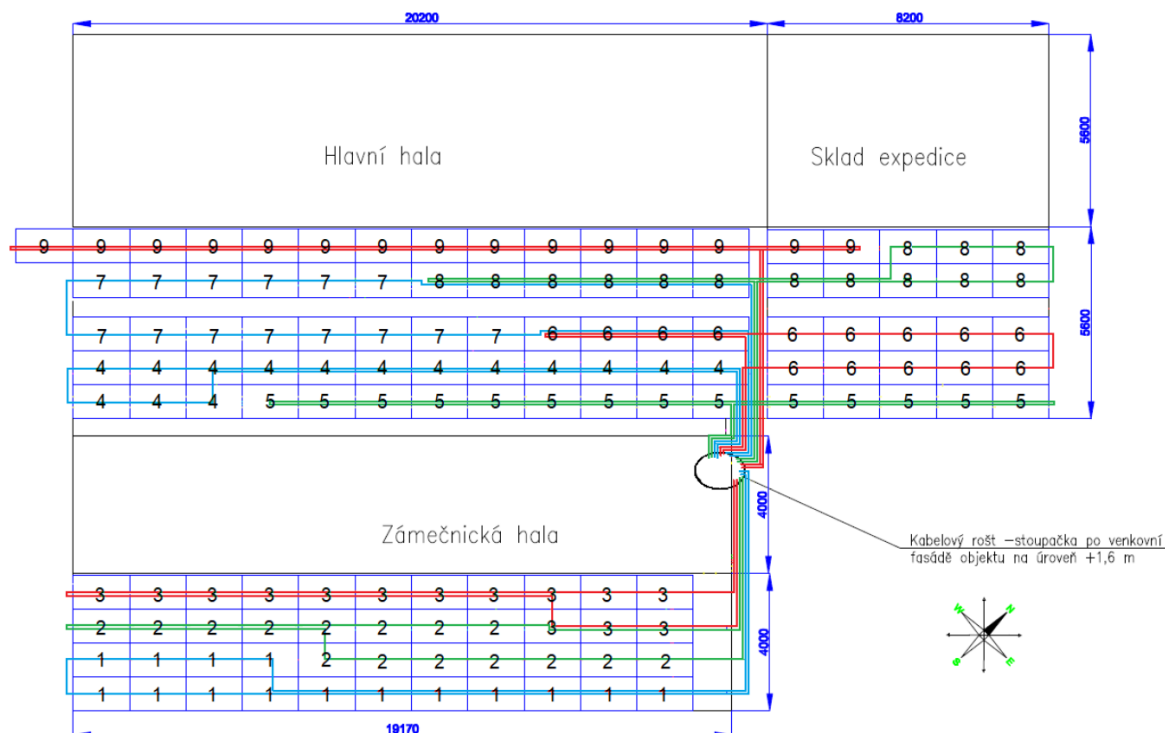
Zapojení systému:

Systém obsahuje tři invertory AURORA PVI-12.5-OUTD-FS-CZ. K těmto invertorům je celkem připojeno 130 fotovoltaických panelů Ningbo Qixin Solar SL230CE-30P, jejichž parametry jsou uvedeny níže. Tyto panely jsou rozděleny do devíti stringů (do každého invertoru jsou připojeny tři stringy). Konkrétní počet je uveden v tabulce č. 3. Všechny panely jsou natočeny směrem na jihovýchod pod úhlem 35°.

Tabulka č. 3 Počet panelů ve stringu

Invertor č. 1	String č. 1	15 panelů
	String č. 2	15 panelů
	String č. 3	14 panelů
Invertor č. 2	String č. 4	15 panelů
	String č. 5	14 panelů
	String č. 6	14 panelů
Invertor č. 3	String č. 7	14 panelů
	String č. 8	14 panelů
	String č. 9	15 panelů

Schéma zapojení:



Obrázek č. 32 Schéma měřeného fotovoltaického systému

Invertor AURORA PVI-12.5-OUTD-FS-CZ

Vstupní parametry:

- nominální výkon DC: 13 kW,
- max. doporučený výkon DC: 14,3 kW,
- nejvyšší přípustné vstupní napětí: 900 V,
- počet nezávislých MPPT kanálů: 2,
- max. vstupní výkon pro jeden MPPT: 8 kW,
- počet DC vstupů: 6 (3 pro každý MPPT),
- max. proud DC pro jeden MPPT: 18 A. [40]

Výstupní parametry:

- nominální výkon AC: 12,5 kW,
- max. výkon AC: 13,8 kW,
- nominální napětí AC: 3 x 400 V,
- nominální frekvence AC: 50 Hz,
- max. proud jedné fáze AC: 20 A,
- účinnost: 1. [40]

Účinnost konverze:

- max. účinnost: 97,7 %,
- euro účinnost: 97,25 %. [40]



Obrázek č. 33 Invertor AURORA PVI-12.5-OUTD-FS-CZ

Panel Ningbo Qixin Solar – SL230CE – 30P

- maximální výkon: 230 W,
- napětí při zátěži: 30,36 V,
- proud při zátěži: 7,58 A,
- napětí naprázdno: 36,42 V,
- proud nakrátko: 8,11 A,
- účinnost modulu: 14,17 %,
- teplotní koeficient proudu I_{SC} (alfa): 0,04 %/°C,
- teplotní koeficient napětí U_{OC} (beta): -0,38 %/°C,
- teplotní koeficient výkonu P_{max} (gama): -0,47 %/°C,
- NOCT: 47 ± 2 °C,
- počet článků: 60,
- rozměry: 1 640 x 990 x 40,
- standardní zkušební podmínky: AM 1,5 1000 W/m² 25 ± 2°C,
- materiál: Polykrystal. [42]

12 Měření na fotovoltaickém systému

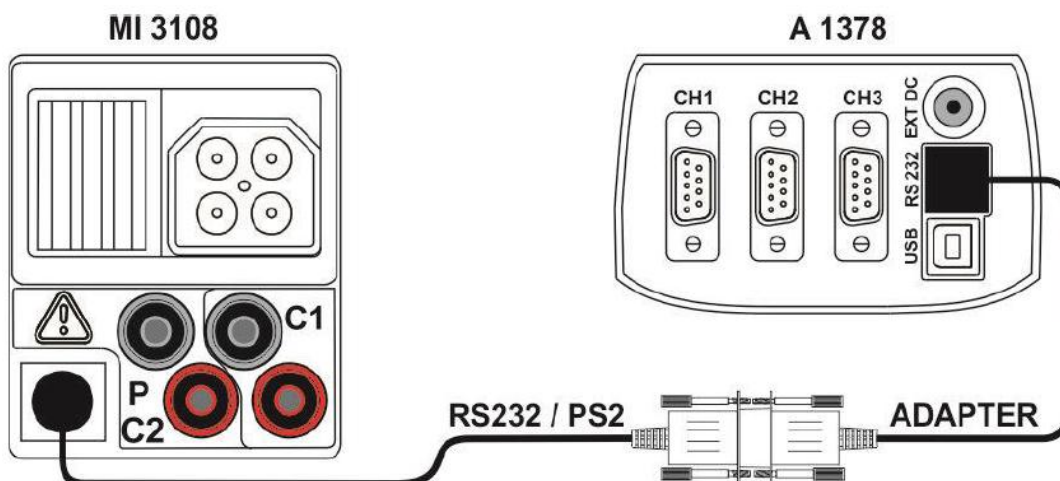
12.1 Příprava před měřením

Před samotnou realizací měření je potřeba provést následující úkony:

- synchronizace času mezi měřicím přístrojem a vzdálenou jednotkou,
- solární nastavení na přístroji,
- nastavení proudových kleští,
- vložení struktury měření do přístroje (volitelné).

Synchronizace času mezi měřicím přístrojem a vzdálenou jednotkou

Pro správně provedené měření je nutné, aby byla synchronizace času provedena ještě před jeho realizováním. Díky synchronizaci je možné získat hodnoty intenzity ozáření a teploty pro výpočet STC hodnot. Synchronizace se provádí pomocí propojovacího kabelu, kdy se vzdálená jednotka A 1378 propojí s přístrojem MI 3108. Následně se v menu přístroje navolí synchronizace času a stisknutím tlačítka TEST se potvrdí.



Obrázek č. 34 Zapojení přístroje při synchronizaci [6]

Solární nastavení na přístroji

Na přístroji lze nastavit parametry fotovoltaických panelů a parametry prováděného měření. Tato nastavení musí být provedena pro výpočet STC hodnot. Do paměti přístroje lze vytvořit databázi až 20 fotovoltaických panelů. Tuto databázi je možné vytvořit přímo na měřicím přístroji nebo pomocí PC či mobilního zařízení s následným přenesením do přístroje. Níže uvedená tabulka udává parametry, které je potřeba na přístroji ještě před měřením nastavit.

Tabulka č. 4 Parametry FV panelů [6]

Panel		Jméno FV panelů
P_{max}	1 W ... 2 000 W	Jmenovitý výkon FV panelů
U_{mpp}	10 V ... 999 V	Napětí v bodu maximálního výkonu
I_{mpp}	0,01 A ... 15 A	Proud v bodu maximálního výkonu
U_{0C}	1 V ... 999 V	Napětí naprázdno
I_{SC}	0,01 A ... 15 A	Proud nakrátko
NOCT	1 °C ... 99 °C	Jmenovitá pracovní teplota FV článku
α	-5,00 mA/°C ... 300 mA/°C	Teplotní koeficient I_{SC}
β	-5,00 V/°C ... -0,001 V/°C	Teplotní koeficient U_{0C}
γ	-5,00 %/°C ... 0,999 %/°C	Teplotní koeficient P_{max}
R_s	0,01 Ω ... 9,99 Ω	Sériový odpor FV panelů

Nastavení parametrů fotovoltaických panelů bylo provedeno dle parametrů výrobce. Protože teplotní koeficienty I_{SC} a U_{0C} (α a β) byly zadány v relativních hodnotách, bylo potřeba je přepočítat na hodnoty absolutní. Tyto přepočty vypadaly následovně:

Koeficient alfa

$$\alpha_{abs} = \frac{\alpha_{rel}}{100} \cdot I_{SC} = \frac{0,04}{100} \cdot 8,11 = 3,244 \text{ mA} \quad (5)$$

Koeficient beta

$$\beta_{abs} = \frac{\beta_{rel}}{100} \cdot U_{0C} = \frac{-0,38}{100} \cdot 36,42 = -0,138 \text{ V} \quad (6)$$

Další parametr, který výrobcem fotovoltaických panelů nebyl zadán, byla hodnota sériového odporu R_s . Metody pro určení přesné hodnoty R_s jsou popsány v normě ČSN EN 60891. Použití těchto metod je ovšem velice obtížně proveditelné. Pro obecné měření a přepočet na STC lze však definovat hodnotu sériového odporu jako 10 mΩ/článek. Výpočet sériového odporu pro měřený fotovoltaický systém tedy vypadal následovně: [5]

Sériový odpor R_s

$$R_s = \text{počet článků} \cdot 0,10 = 60 \cdot 0,10 = 0,6 \text{ Ω} \quad (7)$$

Tabulka č. 5 Nastavení parametrů panelů pro měřený FV systém

Panel	SL230CE – 30P
P_{max}	230 W
U_{mpp}	30,4 V
I_{mpp}	7,58 A
U_{0C}	36,4 V
I_{SC}	8,11 A
NOCT	47 °C
α	3,24 mA/°C
β	-0,138 V/°C
γ	-0,47 %/°C
R_s	0,6 Ω

Dále je důležité při měření fotovoltaického systému nastavit parametry FV měření, viz tabulka č. 6.

Tabulka č. 6 Parametry FV měření [6]

Norma	Výběr normy, podle které se měří [IEC 60891, CEI 82-25]
Irr. senz.	Typ snímače ozáření [FV článek, Pyranometr]
Irr. min.	Minimální platné ozáření pro výpočet [500-1 000 W/m ²]
T. senzor	Teplota použitá pro výpočet [T_{amb} , T_{cell}]
Mod. sér.	Počet sériově zapojených panelů
Mod. par.	Počet paralelně zapojených panelů
Corrcet. T	Korekce změřené teploty článku pro kompenzaci rozdílu mezi skutečnou teplotou článku a změřenou teplotou [0-5 °C]. Dle normy EN 61829 je typický rozdíl 2 °C. [V_{yp} , 1-5 °C)
Warn. Irr	Mez pro upozornění na nestabilní ozáření [V_{yp} , 1-20 %]
Warn. U_{0C}	Mez pro upozornění na nesprávné U_{0C} [V_{yp} , 5-50 %]

Měřený fotovoltaický systém se skládal z 9 stringů o různém počtu sériově zapojených panelů. Proto bylo při měření třeba dbát na to, aby byl tento počet správně nastaven, jinak by mohlo dojít k chybnému přepočtu.

Tabulka č. 7 Nastavení FV měření pro měřený systém

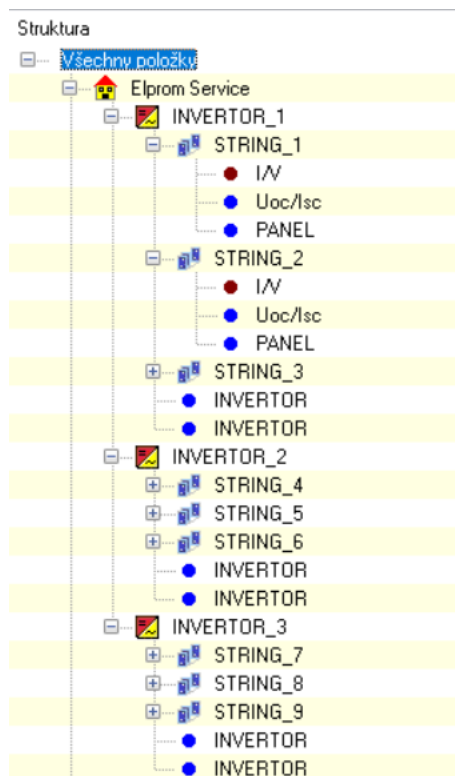
Norma	IEC 60891
Irr. senz.	FV článek
Irr. min.	500 W/m ²
T. senzor	T_{cell}
Mod. sér.	14-15
Mod. par.	1
Corrcet. T	2 °C
Warn. Irr	2 %
Warn. U_{0C}	20 %

Nastavení proudových kleští

Aby kleště odečítaly správné hodnoty, musí se provést jejich nastavení. V menu přístroje lze nastavit jejich vstupy C1 a C2/P. Tlačítkem TEST se zvolí jeden ze dvou vstupů. Následně se pomocí šipek nastaví model a rozsah použitých proudových kleští. Změna parametrů se opět potvrdí tlačítkem TEST a nakonec se pomocí tlačítka MEM celé nastavení uloží.

Vložení struktury měření do přístroje (volitelné)

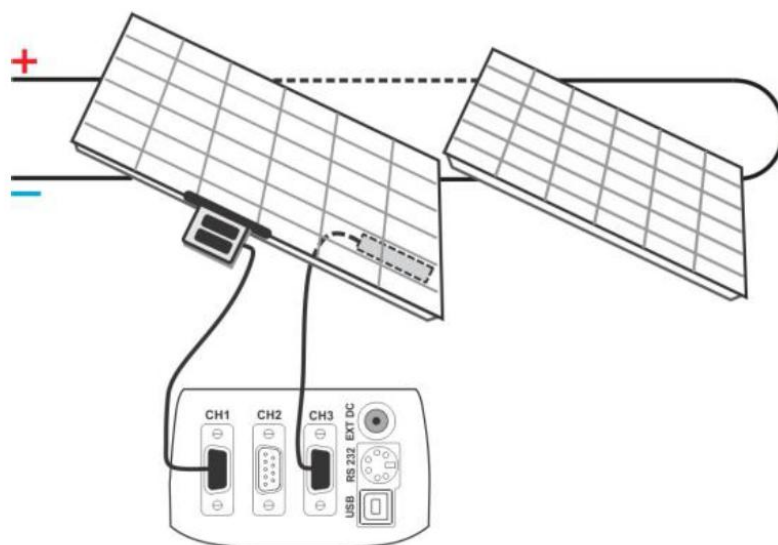
Pomocí programu EuroLink PRO lze do přístroje vložit strukturu celého objektu (viz obr. č. 35), do které lze následně ukládat výsledky jednotlivých měření, přesně k danému prvku. Tím lze získat lepší přehled o celém měření.



Obrázek č. 35 Struktura měření v programu EuroLink PRO

12.2 Měření parametrů okolí

Měření parametrů okolí, kam patří měření intenzity slunečního ozáření a teploty, je velice důležité pro výpočet STC hodnot. Aby bylo možné přepočítat realizovat, je potřeba, aby intenzita ozáření byla větší než 500 W/m^2 .



Obrázek č. 36 Schéma zapojení – měření parametrů okolí [6]



Obrázek č. 37 Reálné zapojení – měření parametrů okolí (teplotní sonda a referenční články)



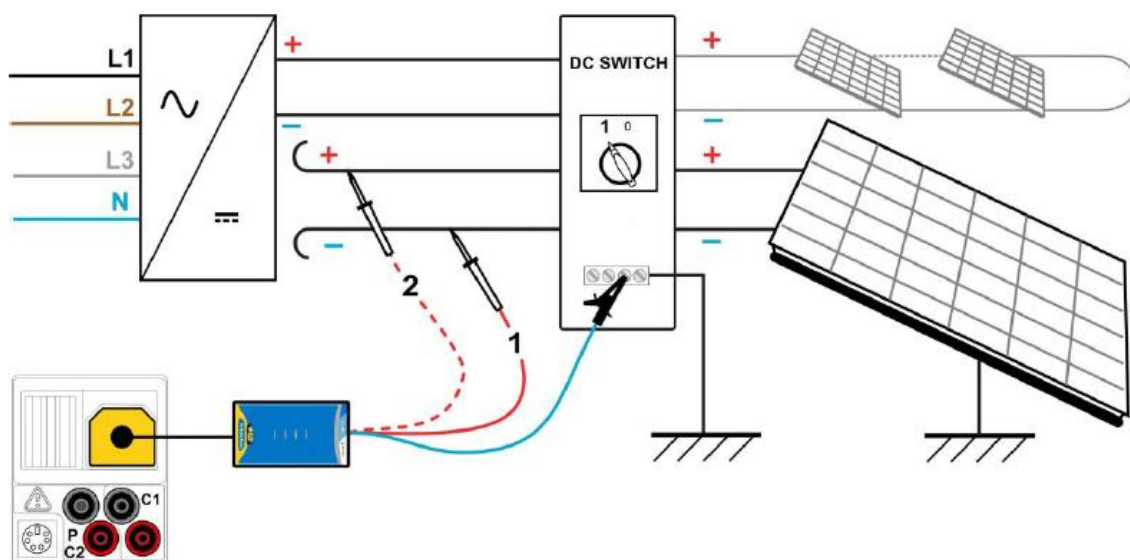
Obrázek č. 38 Reálné zapojení – měření parametrů okolí (propojení se vzdálenou jednotkou)

Průběh měření:

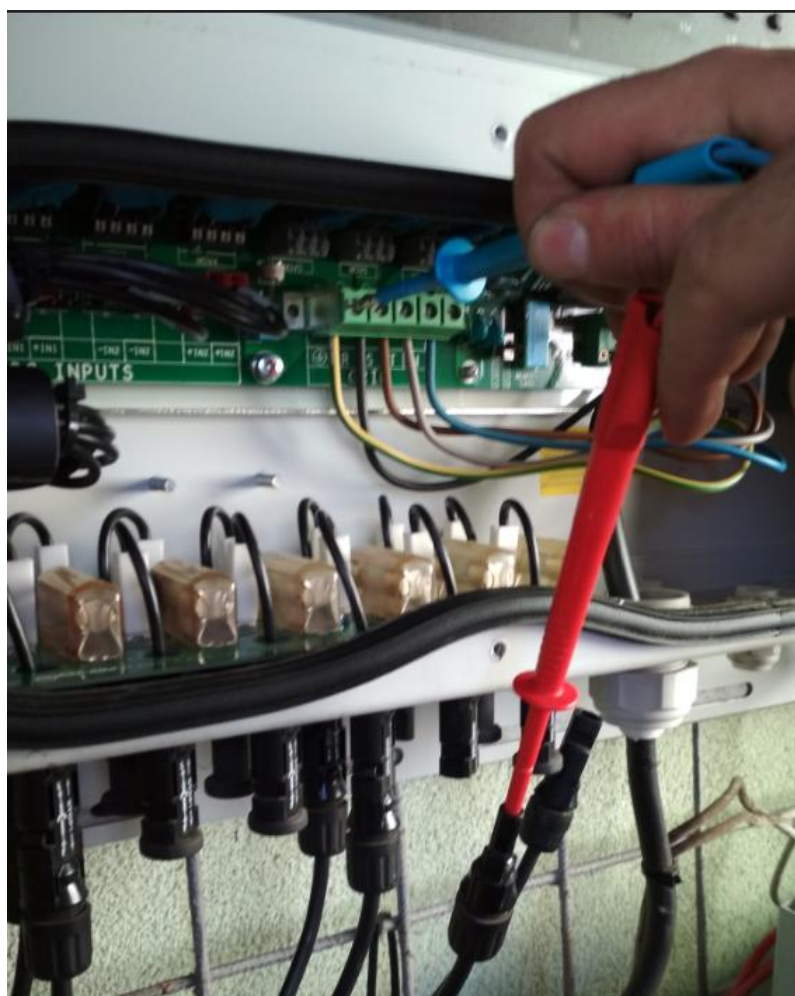
Toto měření bylo realizováno pomocí vzdálené jednotky a komponentů. Prvním komponentem byl monokrystalický PV referenční článek. Ten se pomocí kleští upevnil přímo k panelu a vývod se připojil do vzdálené jednotky na konektor CH1. Druhý komponent tvořila sonda pro měření teploty. Ta se upevnila na zadní stranu panelu pomocí kleští a její vývod se připojil do vzdálené jednotky na konektor CH3. Následně se pomocí tlačítka TEST spustilo měření, které probíhalo do té doby, než byla provedena všechna ostatní měření pomocí přístroje MI 3108.

12.3 Měření izolačního odporu

Měření izolačního odporu se provádí z důvodu zajištění bezpečnosti před úrazem elektrickým proudem. K tomu by mohlo dojít v důsledku poškození izolace u živých částí fotovoltaického systému.



Obrázek č. 39 Schéma zapojení – měření izolačního odporu [6]



Obrázek č. 40 Reálné zapojení – měření izolačního odporu

Průběh a vyhodnocení měření:

Toto měření bylo provedeno pro každý string zvlášť. Nejdříve bylo potřeba k měřicímu přístroji připojit bezpečnostní sondu. Konektory bezpečnostní sondy se v případě měření R_{OC+} připojily mezi zem a kladný pól stringu. V případě měření R_{OC-} byly konektory připojeny mezi zem a záporný pól stringu. Dále se dle normy ČSN EN 62446-1 vypočítala velikost systémového napětí. Tento výpočet je ovlivněn velikostí napětí naprázdno a počtem panelů ve stringu. Pro měřený systém bylo tedy potřeba provést dva výpočty (pro 14 a 15 panelů ve stringu).

Výpočty systémových napětí vypadaly následovně:

$$\text{Systémové napětí pro 14 panelů} = U_{0C} \cdot 1,25 \cdot 14 = 36,42 \cdot 1,25 \cdot 14 = 637,35 \text{ V} \quad (8)$$

$$\text{Systémové napětí pro 15 panelů} = U_{0C} \cdot 1,25 \cdot 15 = 36,42 \cdot 1,25 \cdot 15 = 682,88 \text{ V} \quad (9)$$

V závislosti na výsledné hodnotě systémového napětí se na přístroji nastavila velikost testovacího napětí podle tabulky č. 2. Nastavená hodnota napětí tedy byla 1 000 V. Následně se pomocí tlačítka TEST spustilo měření. Všechny výsledky byly pomocí tlačítka MEM uloženy do paměti přístroje.

Tabulka č. 8 Naměřené hodnoty izolačních odporů

	String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
R_{OC+} (MΩ)	138,7	128,4	159,2	114,6	125,3	164	133	146,4	126
R_{OC-} (MΩ)	102,2	88,9	114	77,4	97,4	95,4	88	104,6	85,8

Dle normy ČSN EN 62446-1 by měla být hodnota izolačního odporu minimálně 1 MΩ. Tato hodnota je ve všech případech několikanásobně vyšší než předepisované minimum. Z hlediska izolačního odporu lze tedy systém požadovat za bezpečný.

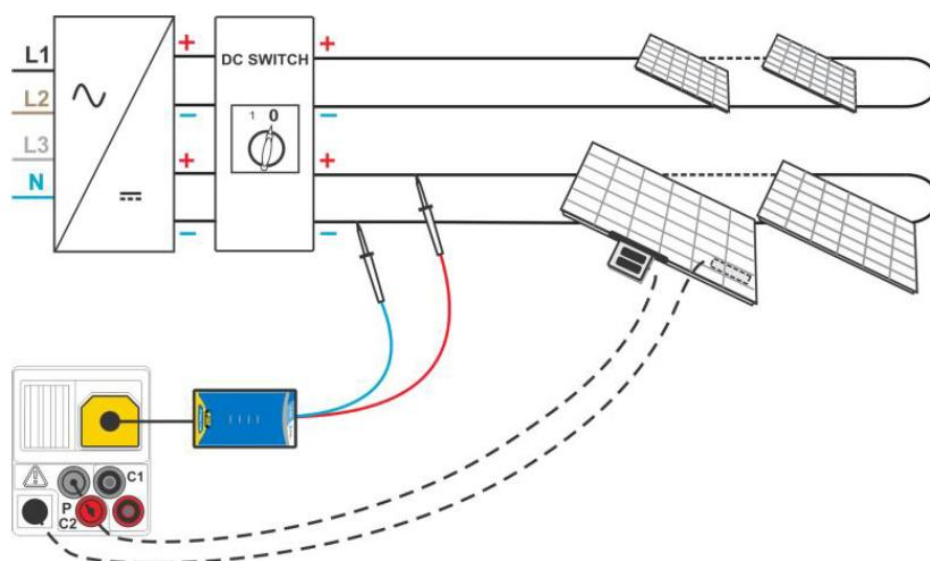
Z uvedené tabulky je dále patrné, že hodnoty izolačních odporů se pro jednotlivé stringy dost odlišují. To může být způsobeno například sníženou izolační schopností fotovoltaických panelů nebo kabelového vedení. Dále jsou patrné velké rozdíly mezi hodnotami izolačních odporů u kladných a záporných pólů stringů. Ty mohou být zapříčiněny svodovými proudy. Ty se u panelů z těchto let často objevují a mohou souviset s PID.

Velký vliv na velikost izolačního odporu má také počasí. Obecně je doporučeno provádět měření izolačního odporu v ranních hodinách, kdy jsou panely ještě mokré vlivem vlhkosti ranní rosy.

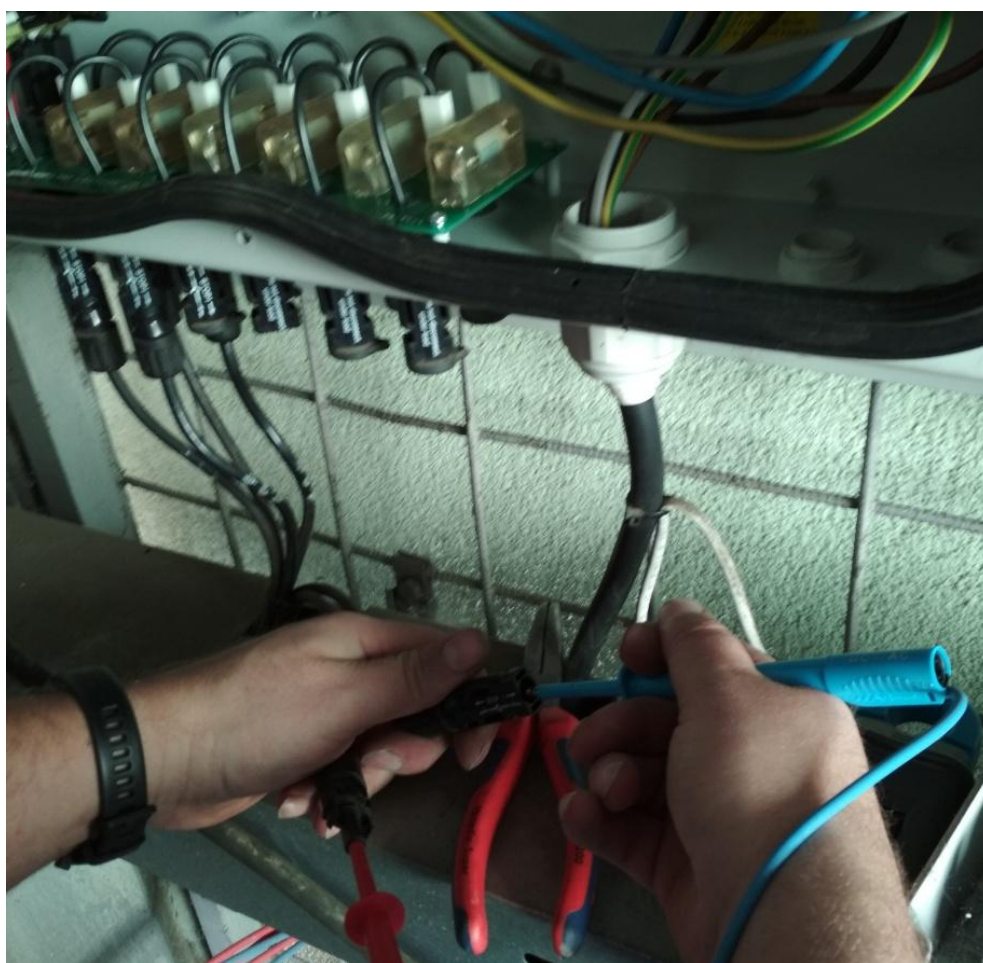
12.4 Měření U_{0C} a I_{SC}

Pomocí měření napětí naprázdno U_{0C} lze zjistit, zda jsou všechny panely ve stringu správně zapojeny. Je možné diagnostikovat například připojení panelů v opačné polaritě nebo zapojení špatného počtu panelů do stringu.

Z hodnoty proudu nakrátko I_{SC} je možné zjistit, zda jsou panely na měřeném stringu v pořádku. Pokles hodnoty proudu nakrátko může být zapříčiněn například zastíněním, znečištěním, vadou některého z panelů...



Obrázek č. 41 Schéma zapojení – měření U_{OC} a I_{SC} [6]



Obrázek č. 42 Reálné zapojení – měření U_{OC} a I_{SC}

Průběh a vyhodnocení měření:

Toto měření bylo opět provedeno pro každý string zvlášť. Vzhledem k tomu, že se měření provádělo také pomocí bezpečnostní sondy na odpojeném stringu, bylo provedeno hned po měření izolačního odporu. V tomto případě byl červený vodič bezpečnostní sondy připojen na kladný pól stringu a modrý vodič na záporný pól stringu. Následně se pomocí tlačítka TEST provedlo měření a výsledky se uložily do paměti přístroje.

U tohoto měření bylo důležité správné nastavení parametrů fotovoltaických panelů a parametrů měření (viz tabulky č. 5 a 7). Toto platí i pro měření I-V křivek a pro test FV panelů ve stringu.

Tabulka č. 9 Naměřené hodnoty z měření U_{OC} a I_{SC}

		String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
Změřené	U_{OC} (V)	519	513	477	519	481	479	476	477	513
	I_{SC} (A)	4,67	4,43	5,17	4,21	4,68	4,82	4,89	4,91	4,86
STC	U_{OC} (V)	553	546	510	552	513	512	511	514	553
	I_{SC} (A)	8,42	7,95	8,15	7,19	7,43	7,63	7,69	7,71	7,61
Odchylka (%)	U_{OC}	1,23	-0,05	0,2	1,04	0,61	0,42	0,22	0,81	1,23
	I_{SC}	3,82	-1,97	0,49	-11,34	-8,38	-5,92	-5,18	-4,93	-6,17

Z odchylky, která je uvedena v tabulce č. 9, je patrné, že u vypočtených STC hodnot v případě napětí U_{OC} dochází pouze k minimálním odchylkám hodnot, oproti těm, co udává výrobce panelů. Z toho lze usoudit, že všechny panely jsou zapojeny ve správné polaritě i správném počtu. V případě proudů I_{SC} už je odchylka větší. K největší odchylce dochází u stringu č. 4, u kterého se na osmi panelech nacházela horká místa, způsobená silným znečištěním.

12.5 Měření I-V křivek

Měření I-V křivek slouží k ověření správné funkce fotovoltaických panelů. Pomocí těchto křivek lze zjistit různé problémy fotovoltaických panelů, jako jsou například zastínění, znečištění, PID, porucha panelů, poškození bočníkové diody...

Průběh a vyhodnocení měření:

Toto měření mělo shodné zapojení, jako bylo v případě měření U_{OC} a I_{SC} . Stačilo tedy přístroj přepnout na měření I-V křivek a spustit ho pomocí tlačítka TEST. Naměřené výsledky byly opět uloženy do paměti přístroje.

Tabulka č. 10 Naměřené hodnoty z měření I-V křivek - měření č. 1

		String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
Změřené	U_{0C} (V)	516	510	477	516	482	480	477	477	514
	I_{SC} (A)	5,16	4,93	5,18	3,69	4,68	4,83	4,89	4,91	4,87
	U_{mpp} (V)	424	416	397	435	384	399	387	388	424
	I_{mpp} (A)	4,53	4,37	4,43	3,24	4,01	4,06	4,19	4,32	4,24
	P_{mpp} (W)	1924	1820	1758	1409	1538	1620	1619	1674	1794
STC	U_{0C} (V)	553	547	511	550	513	512	512	514	554
	I_{SC} (A)	8,43	8,03	8,18	6,6	7,43	7,64	7,69	7,71	7,61
	U_{mpp} (V)	436	428	409	446	395	411	401	404	442
	I_{mpp} (A)	7,41	7,12	6,99	5,8	6,36	6,43	6,58	6,78	6,63
	P_{mpp} (kW)	3,23	3,05	2,86	2,59	2,51	2,64	2,64	2,74	2,93

Tabulka č. 11 Naměřené hodnoty z měření I-V křivek - měření č. 2

		String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
Změřené	U_{0C} (V)	510	490	477	513	478	475	475	477	513
	I_{SC} (A)	4,18	1,97	5,08	4,68	4,63	4,73	4,86	4,88	4,81
	U_{mpp} (V)	427	415	396	423	347	335	390	389	422
	I_{mpp} (A)	3,52	1,82	4,4	4,07	4,04	4,05	4,24	4,29	4,22
	P_{mpp} (W)	1503	755	1741	1724	1401	1356	1651	1669	1779
STC	U_{0C} (V)	-	-	512	550	513	510	510	513	551
	I_{SC} (A)	-	-	8,25	7,58	7,47	7,61	7,78	7,77	7,71
	U_{mpp} (V)	-	-	407	439	359	347	404	403	437
	I_{mpp} (A)	-	-	7,14	6,6	6,52	6,51	6,77	6,84	6,76
	P_{mpp} (kW)	-	-	2,91	2,89	2,34	2,26	2,74	2,76	2,95

Pro lepší porovnání byla realizována hned dvě měření s týdenním rozestupem. V tabulkách č. 10 a 11 jsou uvedeny hodnoty, které byly odečteny z I-V křivek. Z těchto hodnot byly následně vytvořeny tabulky č. 12 a 13, které udávají procentuální odchylky vypočtených STC hodnot vůči hodnotám, které jsou dány výrobcem panelů. V případě měření č. 2 došlo během jeho průběhu k poklesu intenzity ozáření pod 500 W/m^2 . Z toho důvodu nebylo možné u stringů č. 1 a 2 provést výpočet STC hodnot. U druhého měření byl navíc u stringu č. 4 špatně nastaven počet panelů pro výpočet STC hodnot.

Tabulka č. 12 Odchylky vůči hodnotám, které jsou dány výrobcem panelů - měření č. 1

		String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
Odchylka (%)	U_{0C}	1,23	0,13	0,22	0,68	0,61	0,42	0,42	0,81	1,41
	I_{SC}	3,95	-0,99	0,86	-18,62	-8,38	-5,80	-5,18	-4,93	-6,17
	U_{mpp}	-4,26	-6,02	-3,77	-2,06	-7,07	-3,30	-5,66	-4,95	-2,94
	I_{mpp}	-2,24	-6,07	-7,78	-23,48	-16,09	-15,17	-13,19	-10,55	-12,53
	P_{mpp}	-6,38	-11,59	-11,18	-24,93	-22,05	-18,01	-18,01	-14,91	-15,07

Z tabulky č. 12 je patrný pokles výkonu u všech stringů. Největší poklesy výkonu lze pozorovat u stringů č. 4, 5, 6 a 7. U stringů č. 5, 6 a 7 byl pokles způsoben částečným zastíněním panelů. U stringu č. 4 byl pokles opět způsoben horkými místy, která vznikla z důvodu silného znečištění.

Tabulka č. 13 Odchylky vůči hodnotám, které jsou dány výrobcem panelů - měření č. 2

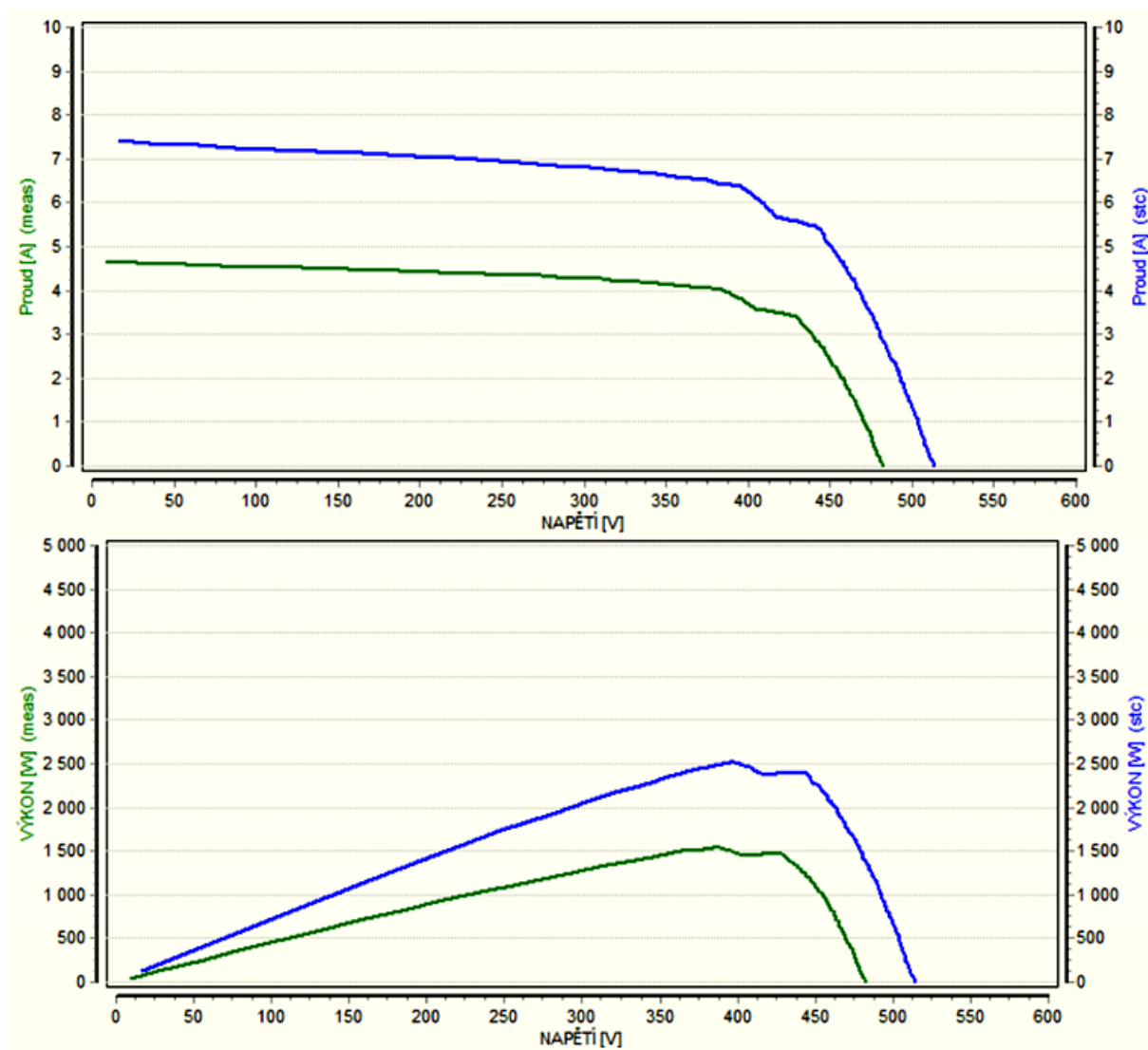
		String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
Odchylka (%)	U_{OC}	-	-	0,42	0,68	0,61	0,02	0,02	0,61	0,86
	I_{SC}	-	-	1,73	-6,54	-7,89	-6,17	-4,07	-4,19	-4,93
	U_{mpp}	-	-	-4,24	-3,60	-15,54	-18,36	-4,95	-5,19	-4,04
	I_{mpp}	-	-	-5,80	-12,93	-13,98	-14,12	-10,69	-9,76	-10,82
	P_{mpp}	-	-	-9,63	-16,23	-27,33	-29,81	-14,91	-14,29	-14,49

Z tabulky č. 13 je opět patrný pokles výkonu u všech stringů. V porovnání s tabulkou č. 12, lze vidět výrazný nárůst výkonu u stringu č. 4, který je pravděpodobně způsoben špatným nastavením počtu panelů při měření. U stringů č. 3 a 7 lze vidět mírný nárůst výkonu. Naopak u stringů č. 5 a 6 je patrný docela výrazný pokles výkonu. Tyto změny byly způsobeny tím, že obě měření probíhala v různých časech, takže poloha slunce a stínů byla rozdílná. Právě v případě druhého měření byly stringy č. 5 a 6 více zastíněny než u prvního měření, což vedlo i k poklesu napětí U_{mpp} . U stringů č. 8 a 9 nebyly zaznamenány žádné výrazné změny.

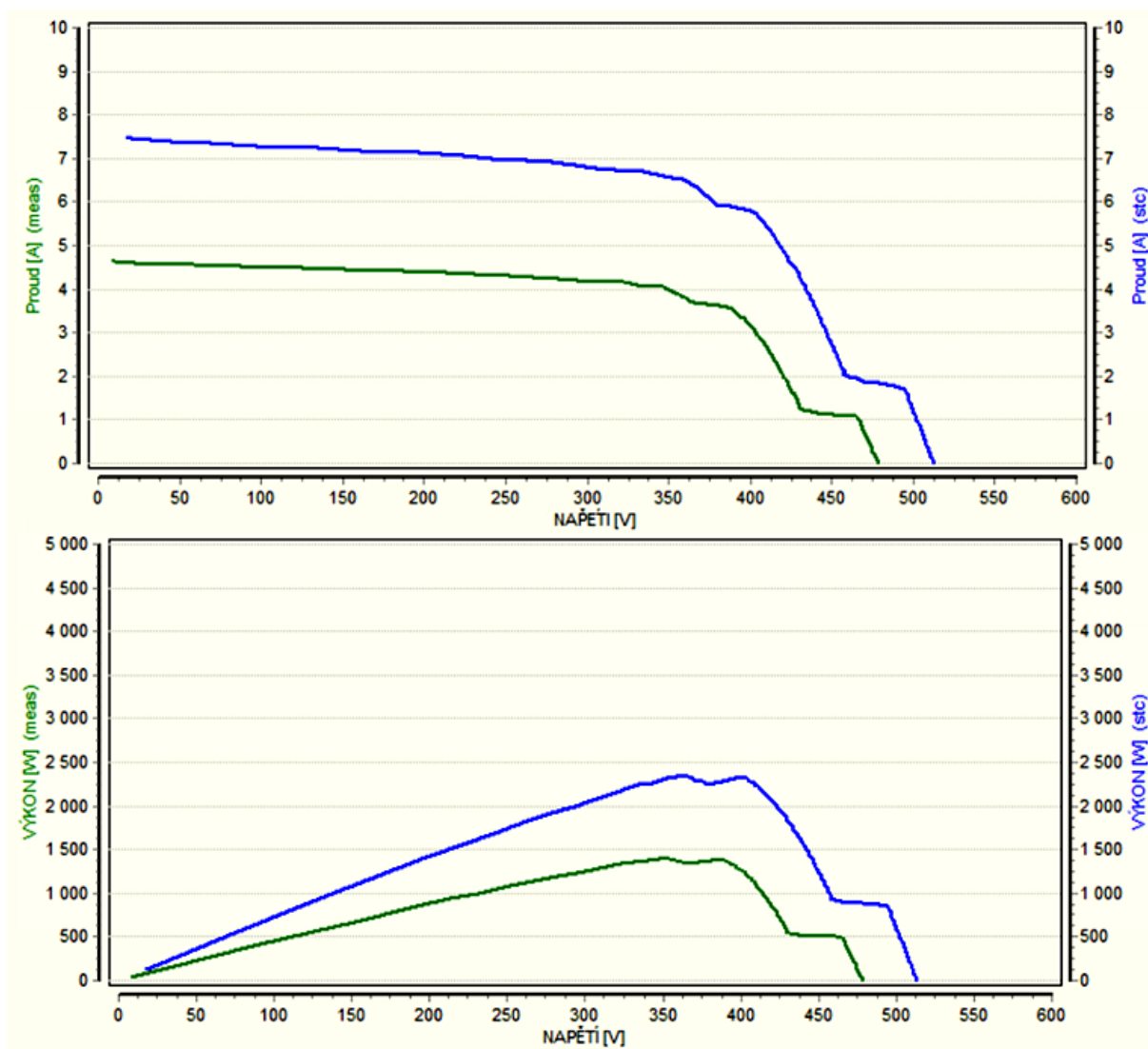
I-V křivky vybraných stringů

String č. 5

I-V křivky stringu č. 5 vykazují deformace v obou případech, jak lze vidět na obrázcích č. 43 a 44. Na obou křivkách jsou patrné poklesy podobající se schodům. Tyto poklesy jsou způsobeny částečným zastíněním panelů měřeného stringu. V případě druhého měření je tato deformace výraznější z důvodu většího zastínění. Obě deformace se projevují i na výsledné hodnotě výkonu P_{mpp} . Ten v případě prvního měření dosahuje hodnoty 2,51 kW a v případě druhého měření hodnoty 2,34 kW. Rozdíl výkonů mezi prvním a druhým měřením je tedy přibližně 170 W. Oproti jmenovitým hodnotám ovšem výkon poklesl v případě prvního měření o 22,05 % a v případě druhého o 27,33 %.



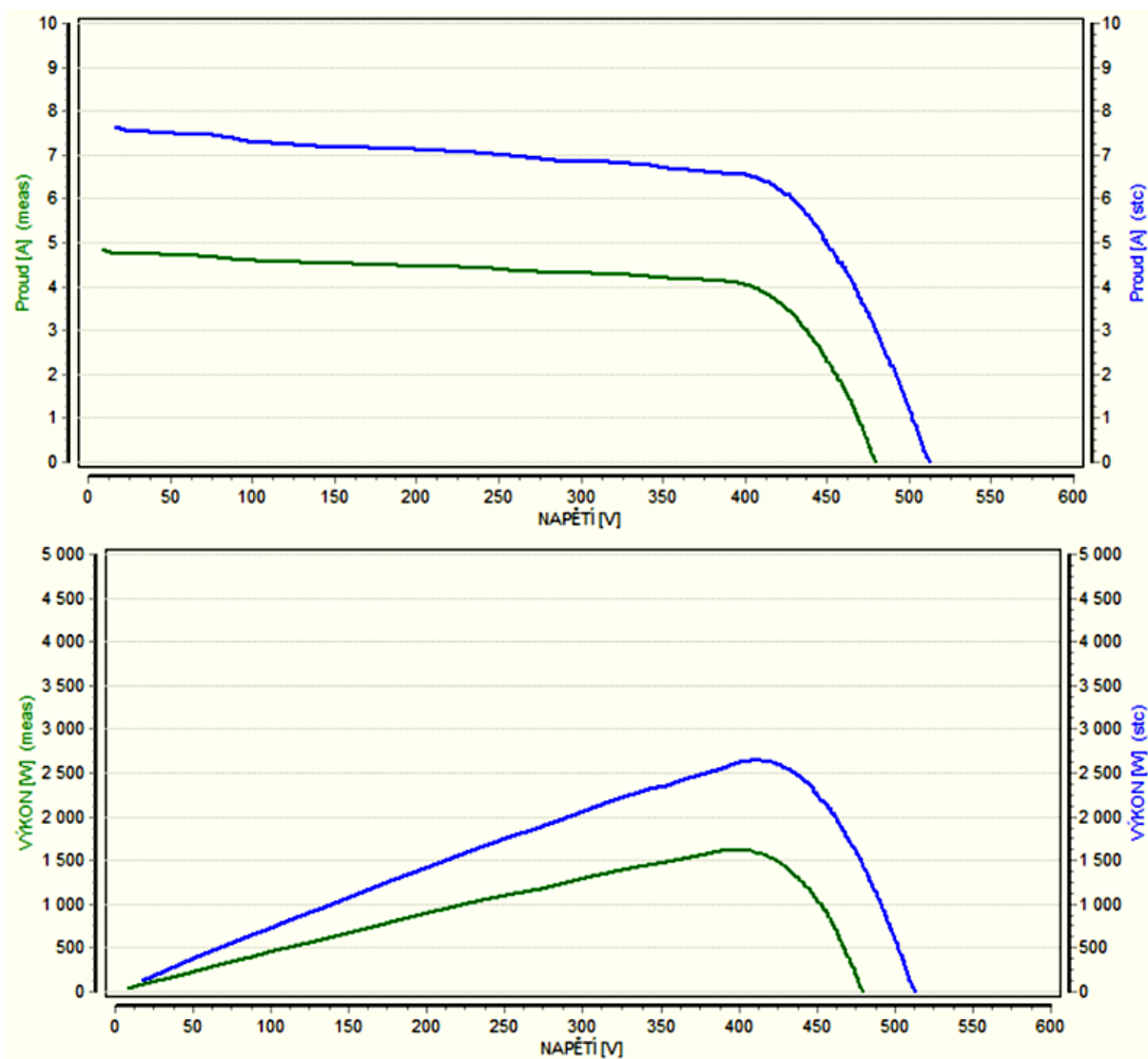
Obrázek č. 43 I-V křivky pro string č. 5 – měření č. 1



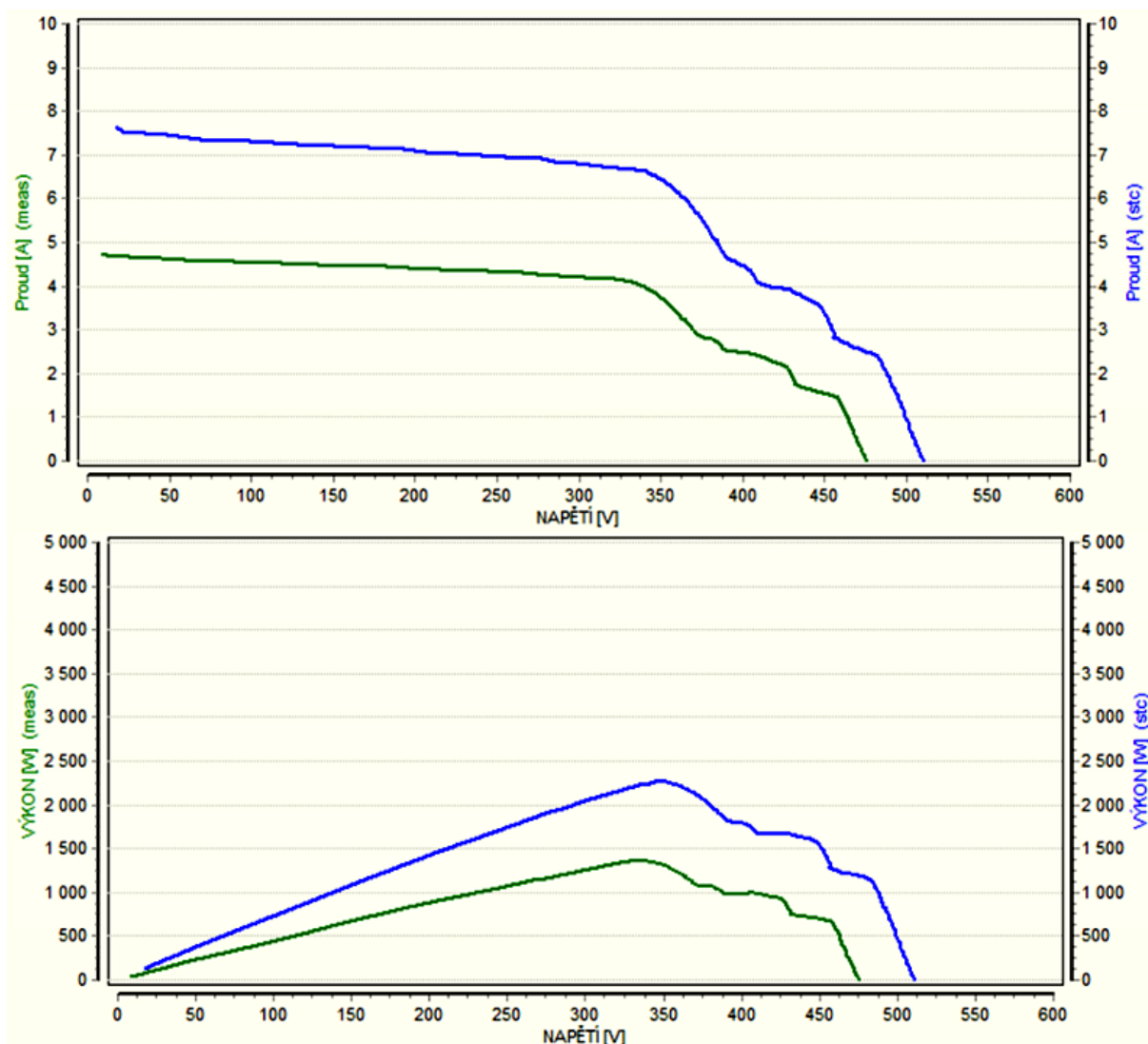
Obrázek č. 44 I-V křivky pro string č. 5 – měření č. 2

String č. 6

Z obrázků č. 45 a 46 je patrné, že v případě stringu č. 6 dochází k výrazné deformaci pouze v případě druhého měření. Tato deformace je opět způsobena částečným zastíněním, které se výrazně projevuje na poklesu celkového výkonu stringu. Oproti prvnímu měření zde dochází k poklesu výkonu o 380 W. Vůči jmenovitým hodnotám však výkon poklesl v případě prvního měření o 18,01 % a v případě druhého měření o 29,81 %.



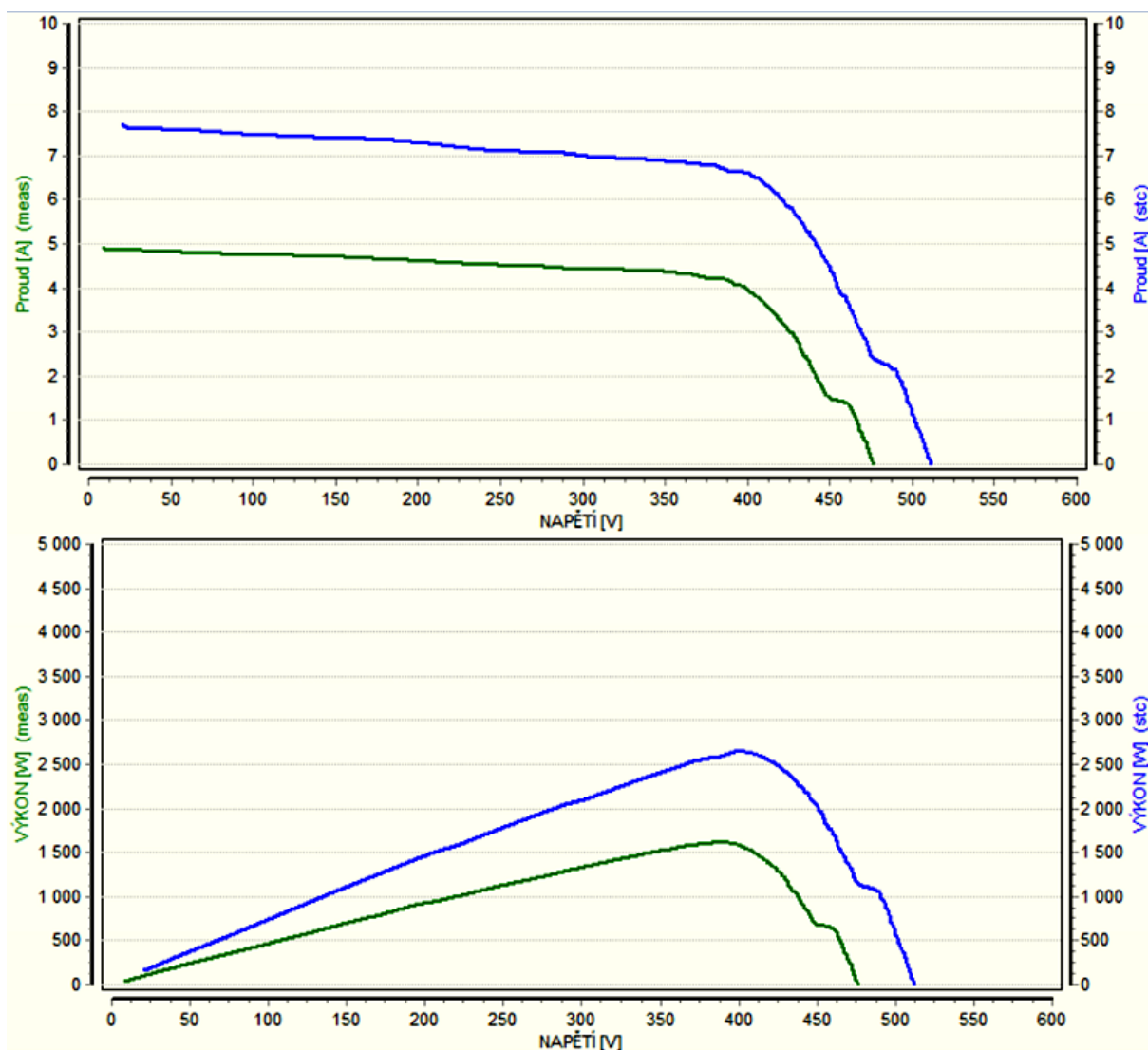
Obrázek č. 45 I-V křivky pro string č. 6 – měření č. 1



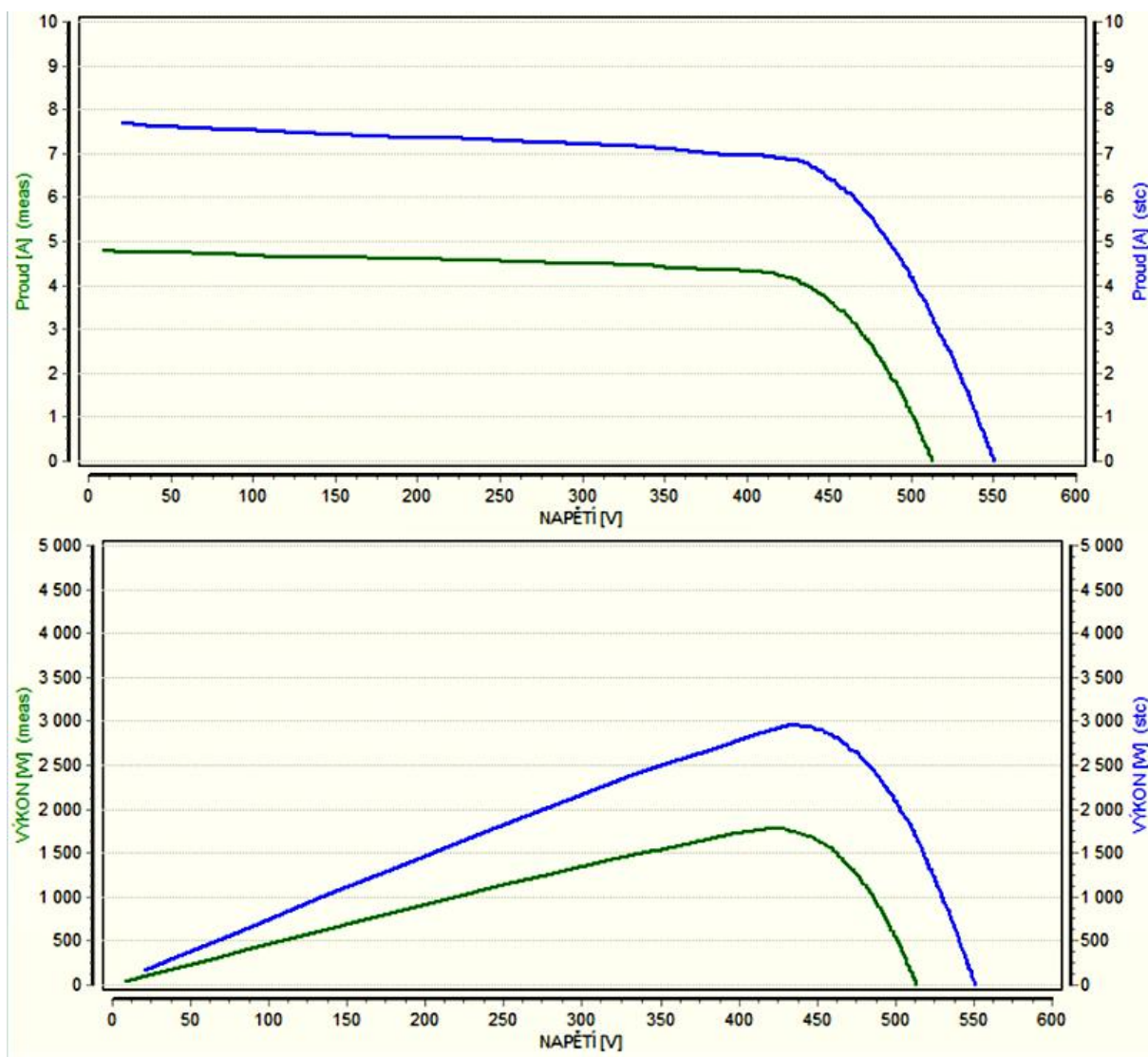
Obrázek č. 46 I-V křivky pro string č. 6 – měření č. 2

String č. 7

Z obrázků č. 47 a 48 je opět patrné, že v případě stringu č. 7 dochází k mírné deformaci pouze v případě prvního měření. Tato deformace je způsobena mírným zastíněním, které se projevuje na poklesu celkového výkonu stringu. Oproti druhému měření zde dochází k poklesu výkonu o 100 W. Vůči jmenovitým hodnotám výkon poklesl v případě prvního měření o 18,01 % a v případě druhého měření o 14,91 %.



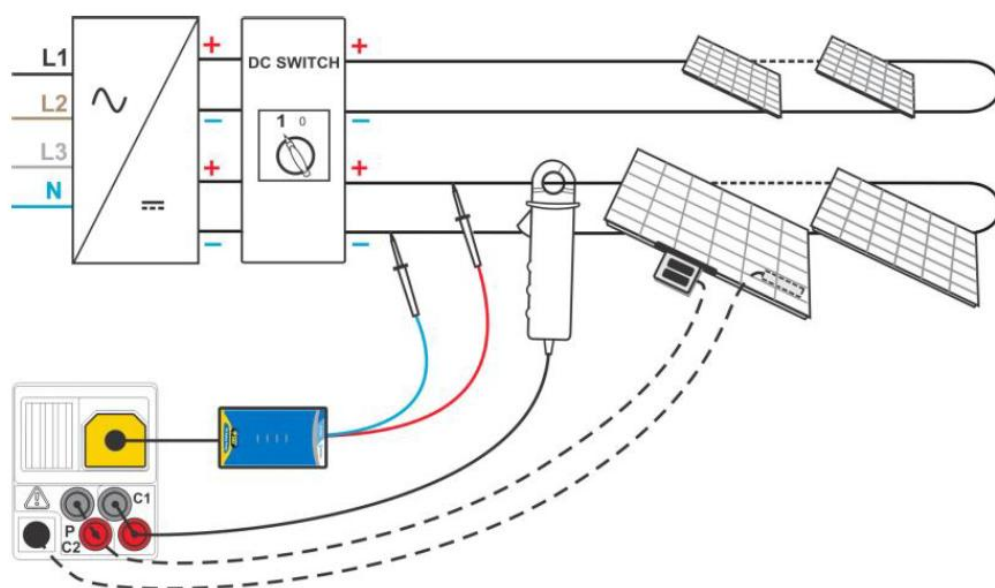
Obrázek č. 47 I-V křivky pro string č. 7 – měření č. 1



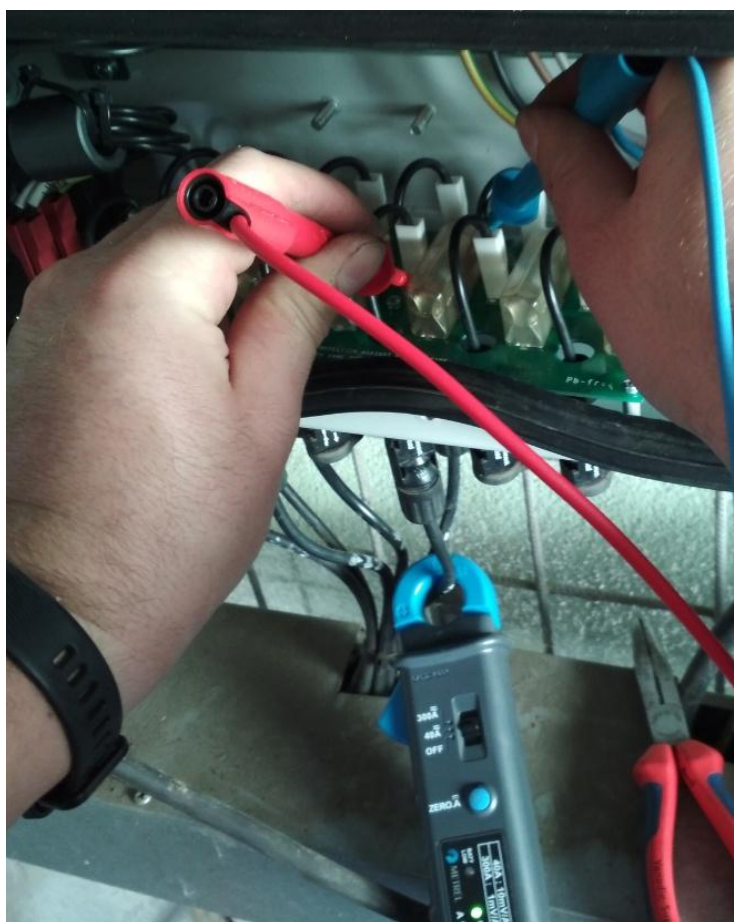
Obrázek č. 48 I-V křivky pro string č. 7 – měření č. 2

12.6 Test FV panelů ve stringu

Test fotovoltaických panelů ve stringu slouží k ověření, zda panely pracují správně. Tímto testem lze zjistit, zda se na měřeném stringu nacházejí nějaké poruchy, nečistoty, stíny... Ty se projeví na hodnotách proudu a napětí, které ovlivní i celkový výkon stringu.



Obrázek č. 49 Schéma zapojení – test FV panelů ve stringu[6]



Obrázek č. 50 Reálné zapojení – test FV panelů ve stringu

Průběh a vyhodnocení měření:

Zapojení při tomto měření bylo obdobou měření U_{OC} a I_{SC} a I-V křivek. Rozdíl byl akorát v tom, že string již byl zapojen zpět k invertoru. Navíc zde byly použity AC/DC proudové kleště pro měření proudů na kladném pólu stringu. Z toho důvodu bylo důležité, aby na přístroji byl správně nastaven rozsah a typ použitých proudových kleští. Měření se následně znovu provedlo pomocí tlačítka TEST a výsledky se uložily do paměti přístroje. Pro přepočet naměřených hodnot na hodnoty STC bylo potřeba, aby se měření U_{OC} a I_{SC} , případně měření I-V křivek provedlo před tímto testem.

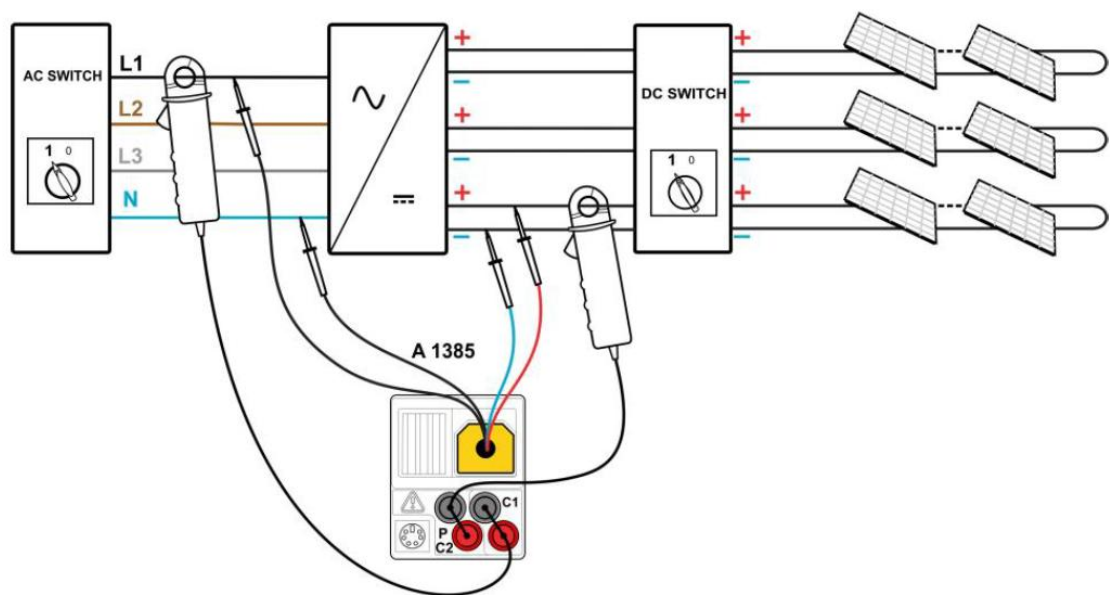
Tabulka č. 14 Naměřené hodnoty při testu FV panelů ve stringu

		String č. 1	String č. 2	String č. 3	String č. 4	String č. 5	String č. 6	String č. 7	String č. 8	String č. 9
Změřené	U (V)	416	412	393	435	386	385	386	386	420
	I (A)	4,35	4,23	4,33	4,04	4,06	4,16	4,45	4,48	4,24
	P (W)	1810	1743	1700	1755	1568	1600	1718	1728	1780
STC	U (V)	424	422	406	444	398	398	400	401	438
	I (A)	7,41	7,14	6,83	6,43	6,44	6,57	7	7,02	6,64
	P (kW)	3,17	3,01	2,77	2,85	2,56	2,61	2,8	2,82	2,91
Ostatní	P_{max} (kW)	3,45	3,45	3,22	3,45	3,22	3,22	3,22	3,22	3,45
	η_{stc} (%)	91,8	87,2	86,1	82,7	79,5	81,1	87	87,5	84,3
	P_{theo} (kW)	2,19	2,16	2,03	2,16	2,02	2,03	2,03	2,04	2,19
	η_{meas} (%)	82,6	80,7	83,7	81,3	77,4	78,8	84,5	84,5	81,2
Odchylka (%)	U	- 6,9	-7,33	-4,48	-2,5	-6,36	-6,36	-5,89	-5,66	-3,82
	I	-2,24	-5,8	-9,89	-15,17	-15,04	-13,32	-7,65	-7,39	-12,4
	P	-8,12	-12,75	-13,98	-17,39	-20,5	-18,94	-13,04	-12,42	-15,65

Z odchylky, která je uvedena v tabulce č. 14, je patrné, že u STC hodnot v případě proudu I a výkonu P dochází opět k největším odchylkám u stringů č. 5 a 6, které byly částečně zastíněny. Pokles výkonu u stringu č. 4 byl opět zapříčiněn poklesem proudu, který byl způsoben horkými místy, nacházejícími se na panelech tohoto stringu.

12.7 Test invertoru

Test invertoru slouží k ověření jeho správné funkčnosti. Z porovnání vstupního výkonu, generovaného fotovoltaickým systémem a výstupního výkonu, který vystupuje z invertoru, lze zjistit jeho celkovou účinnost. Tato účinnost by za celou životnost invertoru měla vykazovat jen velmi malé poklesy oproti jmenovitým hodnotám, které udává výrobce zařízení.



Obrázek č. 51 Schéma zapojení – test invertoru [6]



Obrázek č. 52 Reálné zapojení – test invertoru

Průběh a vyhodnocení měření:

Pro toto měření bylo opět nutné provést správné nastavení typu a rozsahu použitých proudových kleští. Z důvodu větší přesnosti bylo zvoleno měření, u kterého se měřila AC i DC strana zároveň. Pro jeho realizování musel být připojen měřicí vodič se čtyřmi vývody a dvoje proudové kleště. Realizování měření bylo komplikované z důvodu, že celkové DC napětí vstupující do invertoru nebylo možné změřit. Vstupní DC napětí šlo naměřit pouze na dvou MPP trackerech, a proto bylo třeba měření provést hned dvakrát. Z toho důvodu bylo důležité, aby během měření byly hodnoty ozáření stabilní.

Zapojení tedy vypadalo následovně. Na AC straně byly na jednu fázi upevněny AC proudové kleště a vodiče pro měření AC napětí byly připojeny mezi jednu fázi a střední vodič. Na DC straně byly vodiče pro měření DC napětí připojeny na svorky MPP trackeru. DC proudové kleště byly upevněny na jedno nebo dvě stringové vedení kladného pólu, dle počtu stringů připojených k měřenému MPP trackeru. Takto se proměřily oba MPP trackery.

Následně se musel provést přepočítání naměřených hodnot. Naměřené výkony na AC straně byly vždy pro obě měření téměř stejné. Pro korekci tedy stačilo naměřenou hodnotu vynásobit třemi (3 fáze). Výkon na DC straně se získal součtem výkonů naměřených na obou MPP trackerech. Výsledná účinnost je tedy dána poměrem výstupního (AC) výkonu ke vstupnímu (DC) výkonu.

Tabulka č. 15 Naměřené hodnoty při testu inverterů FV

		Invertor č. 1			Invertor č. 2			Invertor č. 3		
		MPP1	MPP2		MPP1	MPP2		MPP1	MPP2	
DC	U (V)	407	392		345	382		385	423	
	I (A)	9,06	4,56		4,21	8,64		8,69	4,37	
	P (W)	3687	1783	5470	1447	3260	4707	3331	1848	5179
AC		L1			L1			L1		
	U (V)	235			235			235		
	I (A)	7,66			6,76			7,26		
	P (W)	1774		5322	1529		4587	1675		5025
Účinnost	η (%)	97,29			97,45			97,03		

I když při měření byly hodnoty ozáření a teploty téměř konstantní, není možné říct, že během měření nedošlo k chybám. I přesto však naměřené a následně přepočtené hodnoty účinnosti odpovídají hodnotám, které udává výrobce. Garantovaná účinnost výrobcem se pohybuje právě okolo 97 %, což je v tomto případě splněno.

12.8 Dokončení měření

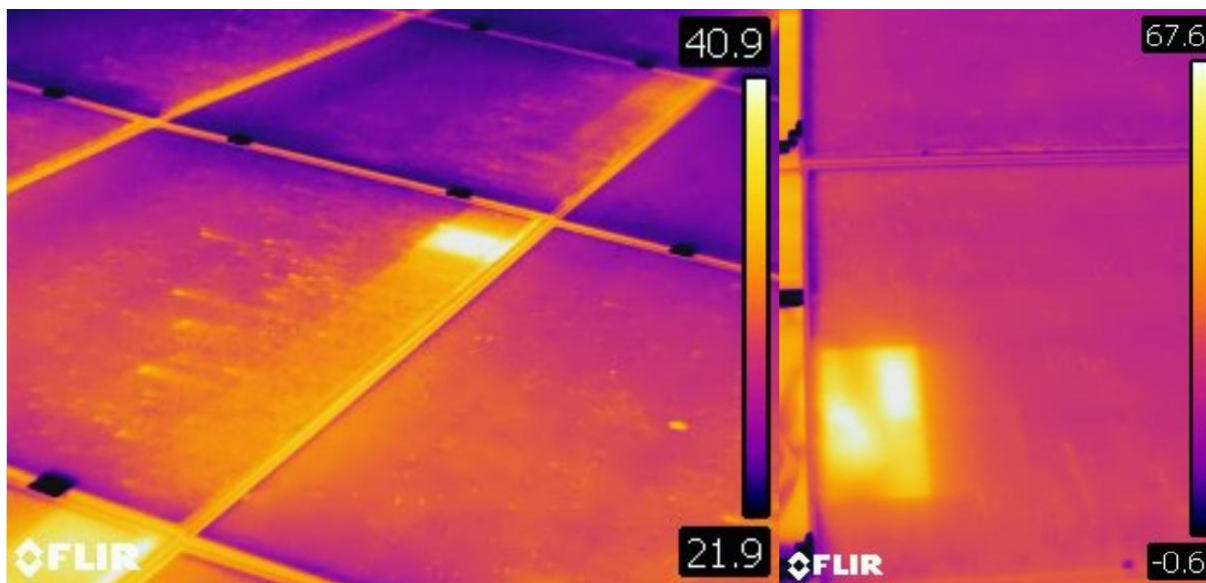
Jakmile bylo celé měření dokončeno, musely se hodnoty ozáření a teplot ze vzdálené jednotky převést do přístroje MI 3108. To se realizovalo pomocí propojovacího kabelu. Následně se v menu přístroje navolila synchronizace dat, která se potvrdila stisknutím tlačítka TEST. Z těchto dat byly následně automaticky vypočteny STC hodnoty. Poté byl přístroj pomocí dalšího kabelu propojen s počítačem, kde se naměřené a vypočtené hodnoty nahrály do programu EuroLink PRO.

12.9 Kontrola pomocí termokamery

Měření pomocí termokamery slouží ke zjištění, zda se na měřeném fotovoltaickém systému nenachází nějaké neobvyklé změny teploty. Ty mohou být způsobeny například zastíněním, znečištěním, selháním bočníkové diody, nekvalitním provedením pájených spojů, špatným propojením atd.

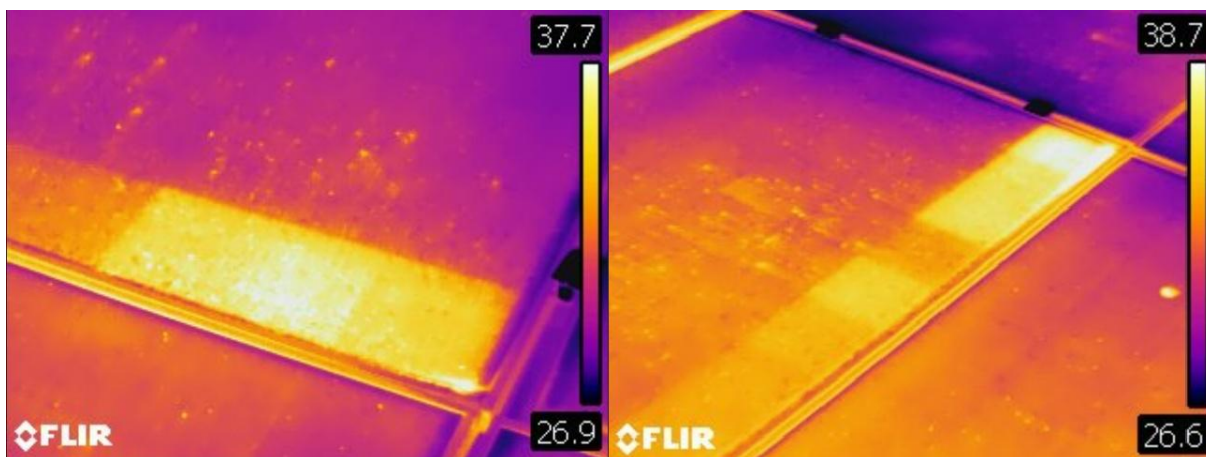
Průběh a vyhodnocení měření:

Měření bylo provedeno pomocí termokamery FLIR T420. Cílem měření bylo zjistit, zda se na panelech nenacházejí nějaké tepelné anomálie. Kvůli špatné přístupnosti zadní strany panelů byly všechny panely měřeny pouze ze strany přední. Na následujících obrázcích lze vidět vybrané snímky, které byly pořízeny během měření.



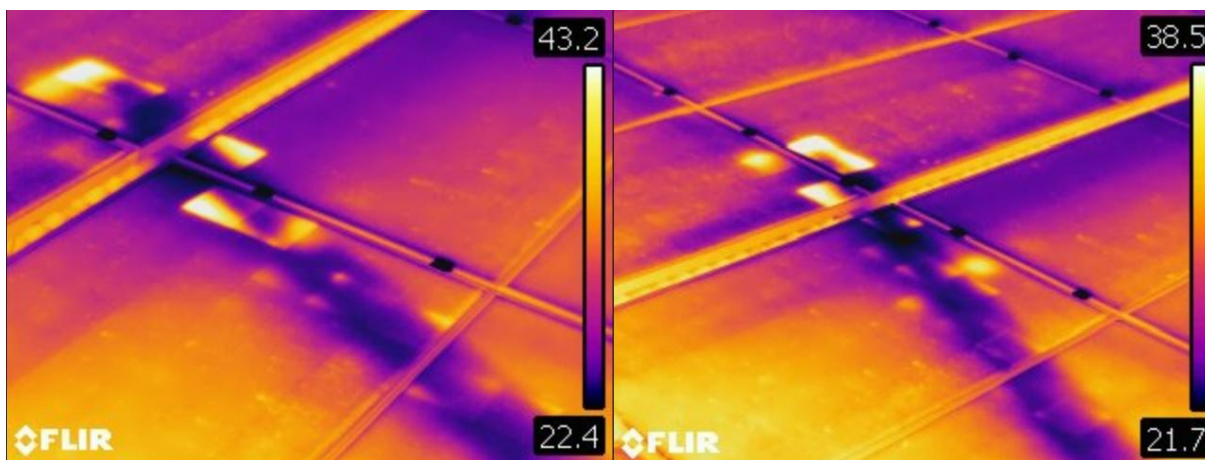
Obrázek č. 53 Horká místa na panelech způsobená poškozením článků

Na obrázku č. 53 je možno vidět zahřátí poškozených fotovoltaických článků. Dále je na levém snímku vidět velice výrazný vliv znečištění.



Obrázek č. 54 Horká místa na panelech způsobená znečištěním

Na obrázku č. 54 je patrné zahřátí celé řady fotovoltaických článků. To se nacházelo hlavně u stringu č. 4, na kterém se tato horká místa nacházela na osmi panelech. Příčinou zahřátí bylo pravděpodobně silné znečištění panelů, které se nacházelo u spodního okraje.



Obrázek č. 55 Horká místa na panelech způsobená zastíněním

Obrázek č. 55 znázorňuje horká místa, která jsou způsobena částečným zastíněním panelů. To bylo způsobeno zhruba dvoumetrovým komínem, který se nachází na střeše, v blízkosti panelů. Články, které jsou postiženy zastíněním, přestanou generovat elektrickou energii. Nezastíněné články ovšem stále generují energii, která prochází i přes zastíněné články. Ty už v tomto případě pracují jako spotřebiče. Vyrobená energie se v nich tedy zmaří a přemění na teplo. Právě toto teplo způsobuje zahřívání postižených článků.

13 Vliv zastínění na výkon fotovoltaického panelu

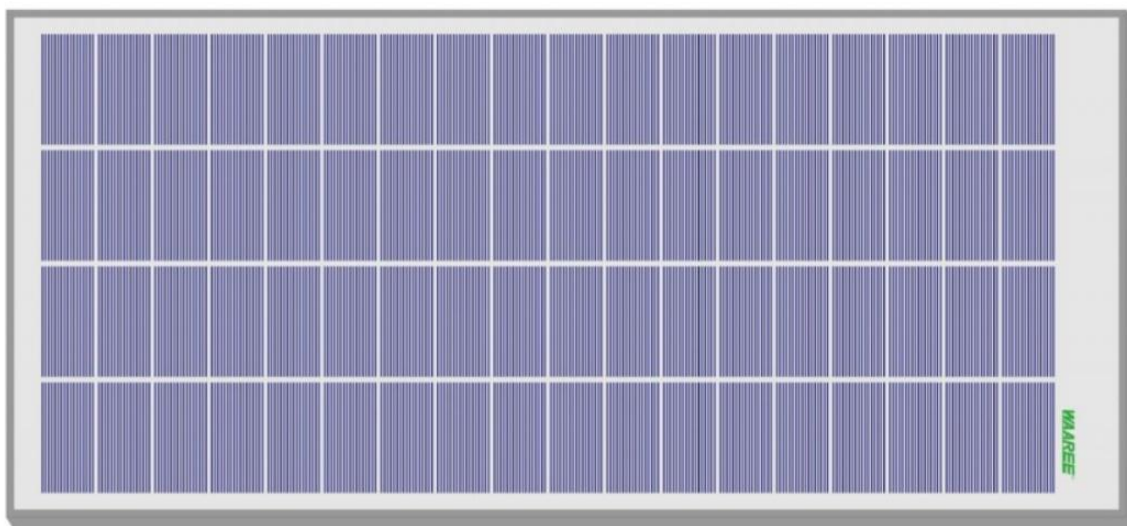
Zastínění fotovoltaického panelu může vést k výraznému snížení jeho výkonu. Právě tímto vlivem se zabývá následující měření, které bylo provedeno na jednom vybraném fotovoltaickém panelu, který byl různě stíněn (měření bylo realizováno už jen jako doplňkové, pro demonstraci tohoto vlivu).

13.1 Parametry měřeného panelu

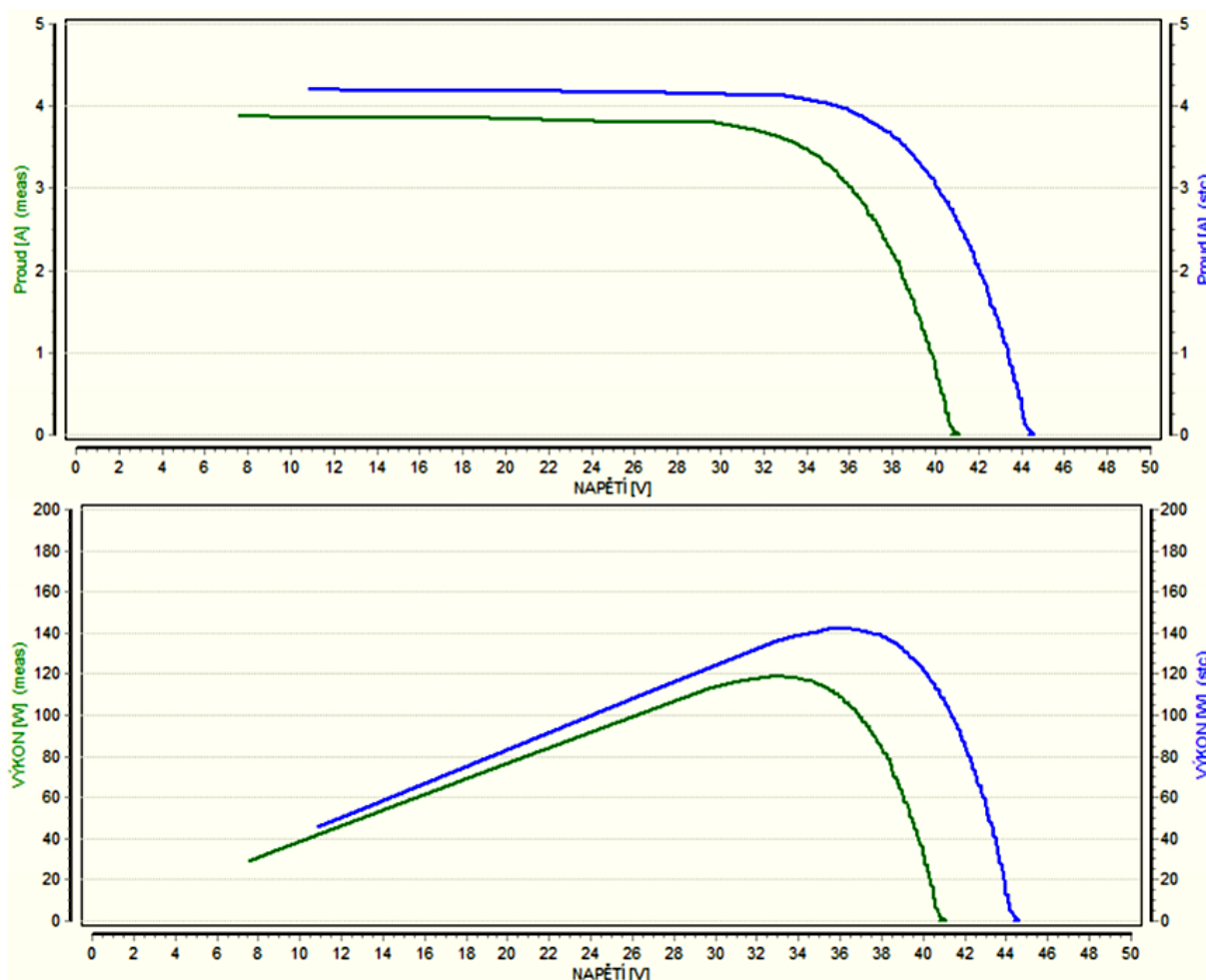
Panel WS-125-24V

- *maximální výkon: 125 W,*
- *napětí při zátěži: 35,73 V,*
- *proud při zátěži: 3,5 A,*
- *napětí naprázdno: 44,13 V,*
- *proud nakrátko: 3,78 A,*
- *účinnost modulu: 12,43 %,*
- *teplotní koeficient proudu I_{SC} (alfa): 0,0681 %/°C,*
- *teplotní koeficient napětí U_{OC} (beta): -0,2941 %/°C,*
- *teplotní koeficient výkonu P_{max} (gama): -0,3845 %/°C,*
- *NOCT: 46 ± 2 °C,*
- *počet článků: 72,*
- *rozměry: 1 490 x 675 x 35,*
- *standardní zkušební podmínky: AM1,5 1000 W/m² 25±2 °C,*
- *materiál: Polykrystal. [9]*

13.2 Nezastíněný FV panel



Obrázek č. 56 Schéma – nezastíněný FV panel



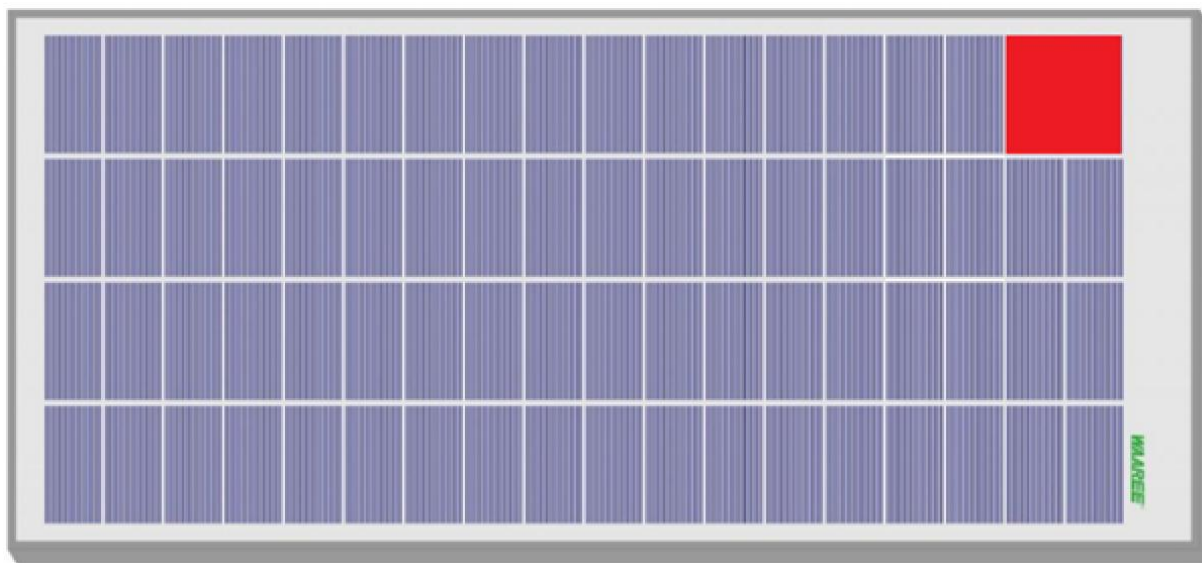
Obrázek č. 57 I-V křivky nezastíněného FV panelu

Vypočtené STC hodnoty:

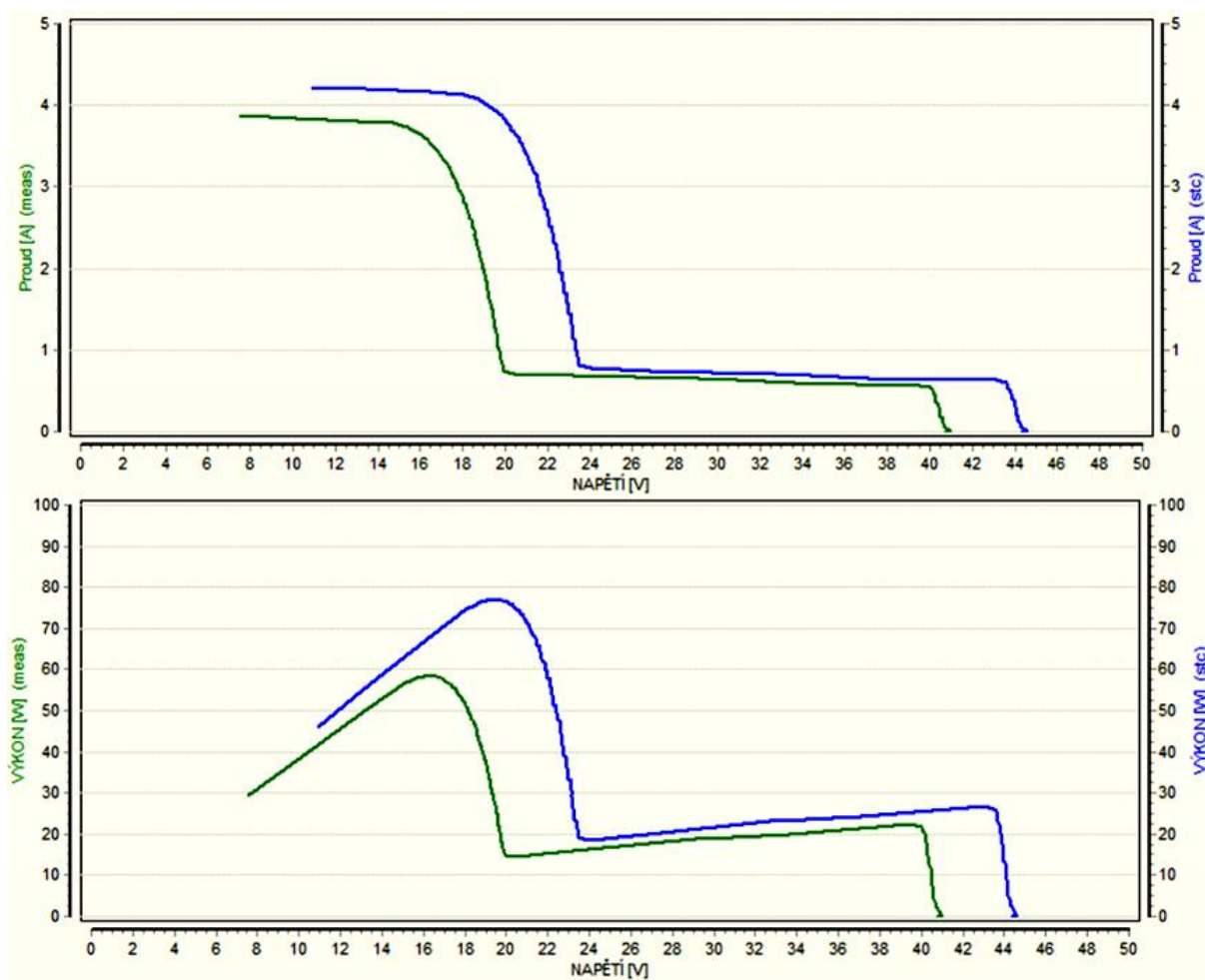
napětí naprázdno: $U_{OC} = 44,3$ V,
 proud nakrátko: $I_{SC} = 4,22$ A,
 napětí v bodu maximálního výkonu: $U_{mpp} = 36,1$ V,
 proud v bodu maximálního výkonu: $I_{mpp} = 3,94$ A,
 maximální výkon: $P_{mpp} = 142$ W.

V případě nezastíněného panelu se na změřených I-V křivkách neobjevují žádné anomálie. Z vypočtených STC hodnot je dokonce patrné, že některé veličiny přesahují hodnoty, které jsou stanoveny výrobcem panelu. To je pravděpodobně způsobeno chybným přepočtem na STC hodnoty nebo tím, že vyrobené panely mohou vyrábět větší výkon, než je uvedeno výrobcem (tento výkon se může obvykle lišit v řádu jednotek procent). Například u proudů I_{SC} a I_{mpp} lze v obou případech vidět nárůst o 0,44 A. Nárůst proudu způsobí také nárůst maximálního výkonu. Ten oproti výkonu, který je stanoven výrobcem, vzrostl o 17 W. Napětí U_{OC} a U_{mpp} se téměř shoduje se jmenovitými hodnotami panelu.

13.3 Zastínění dvou článků FV panelu



Obrázek č. 58 Schéma – zastínění dvou článků FV panelu



Obrázek č. 59 I-V křivky při zastínění dvou článků FV panelu

Vypočtené STC hodnoty:

napětí naprázdno: $U_{0C} = 44,3 \text{ V}$,

proud nakrátko: $I_{SC} = 4,23 \text{ A}$,

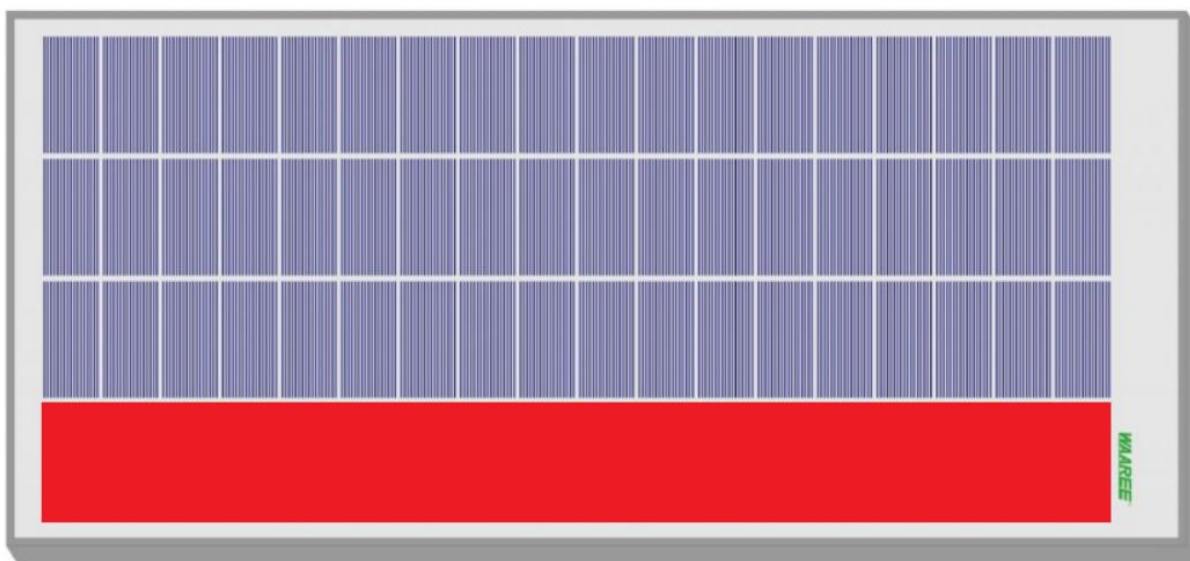
napětí v bodu maximálního výkonu: $U_{mpp} = 19,7 \text{ V}$,

proud v bodu maximálního výkonu: $I_{mpp} = 3,91 \text{ A}$,

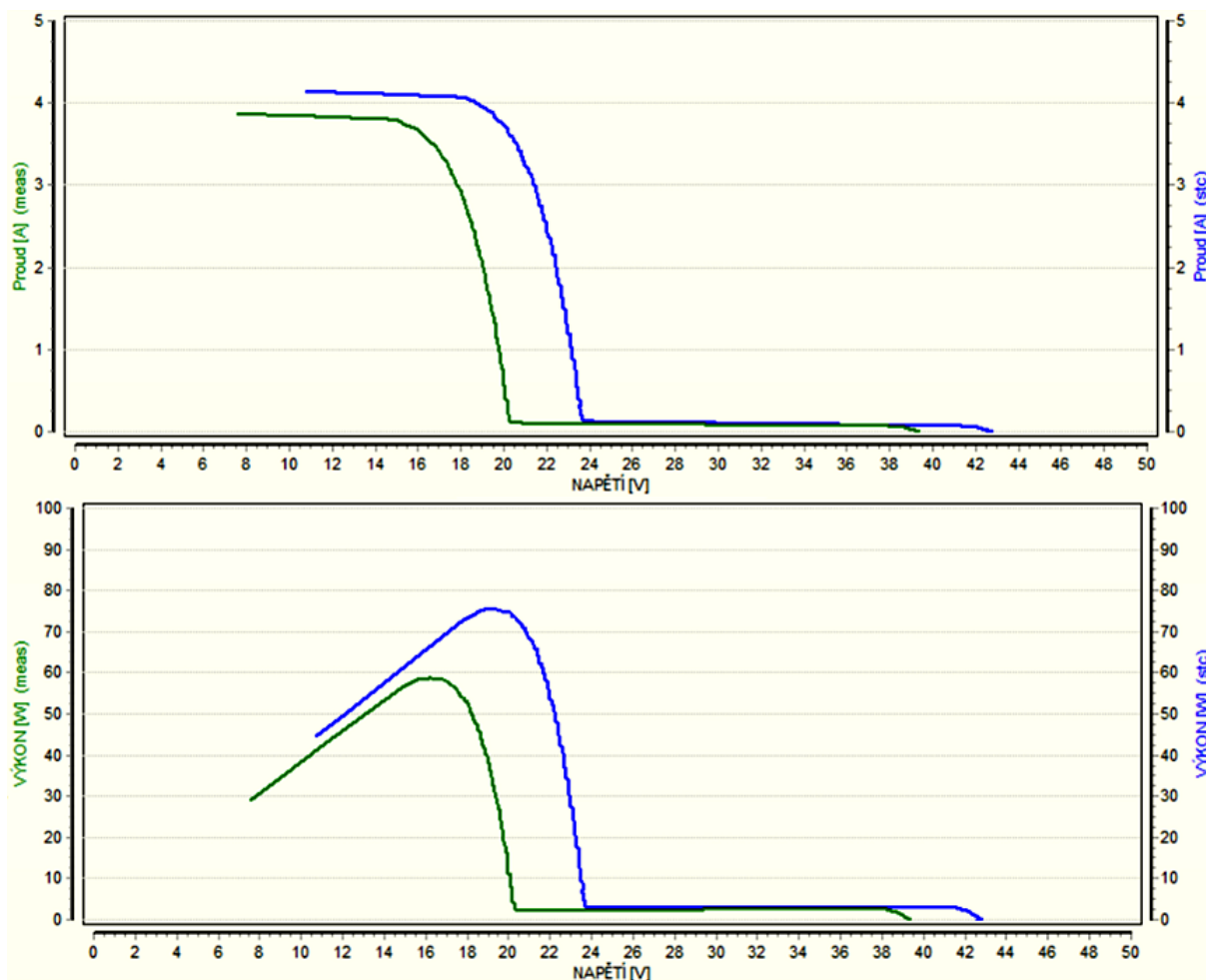
maximální výkon: $P_{mpp} = 77 \text{ W}$.

V případě zastínění dvou článků umístěných pod sebou již dochází k deformaci I-V křivek. Dochází zde k posunutí bodu MPP, který se na napěťové a výkonové ose posunul směrem k nižším hodnotám. Za tímto bodem dále nastane prudký pokles na proudové a výkonové ose. Při porovnání s nezastíněným panelem jsou z vypočtených STC hodnot patrné jen minimální změny u proudů I_{SC} a I_{mpp} a u napětí U_{0C} . Naopak výrazný pokles je vidět u napětí U_{mpp} . To se zmenšilo na 19,7 V, což odpovídá zhruba 55 % napětí U_{mpp} u nezastíněného panelu. Pokles napětí dále způsobil snížení výkonu o 65 W, takže výsledný výkon dosahuje pouze 55 % výkonu nezastíněného panelu.

13.4 Zastínění jedné svislé řady článků FV panelu



Obrázek č. 60 Schéma – zastínění jedné svislé řady článků FV panelu



Obrázek č. 61 I-V křivky při zastínění jedné svislé řady článků FV panelu

Vypočtené STC hodnoty:

napětí naprázdno: $U_{OC} = 42,5 \text{ V}$,

proud nakrátko: $I_{SC} = 4,14 \text{ A}$,

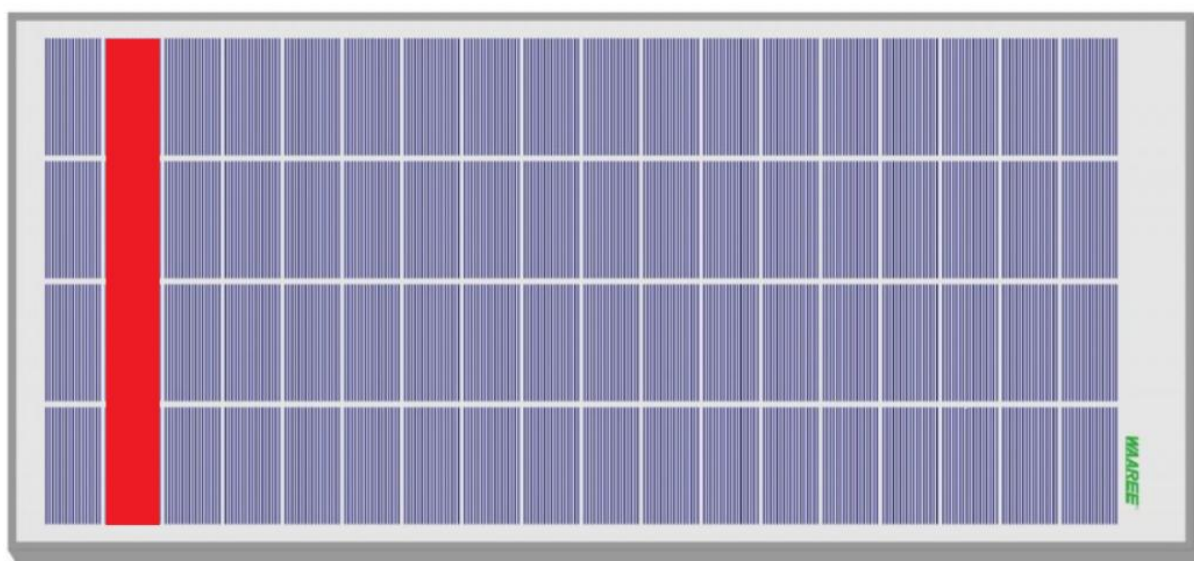
napětí v bodu maximálního výkonu: $U_{mpp} = 19,4 \text{ V}$,

proud v bodu maximálního výkonu: $I_{mpp} = 3,9 \text{ A}$,

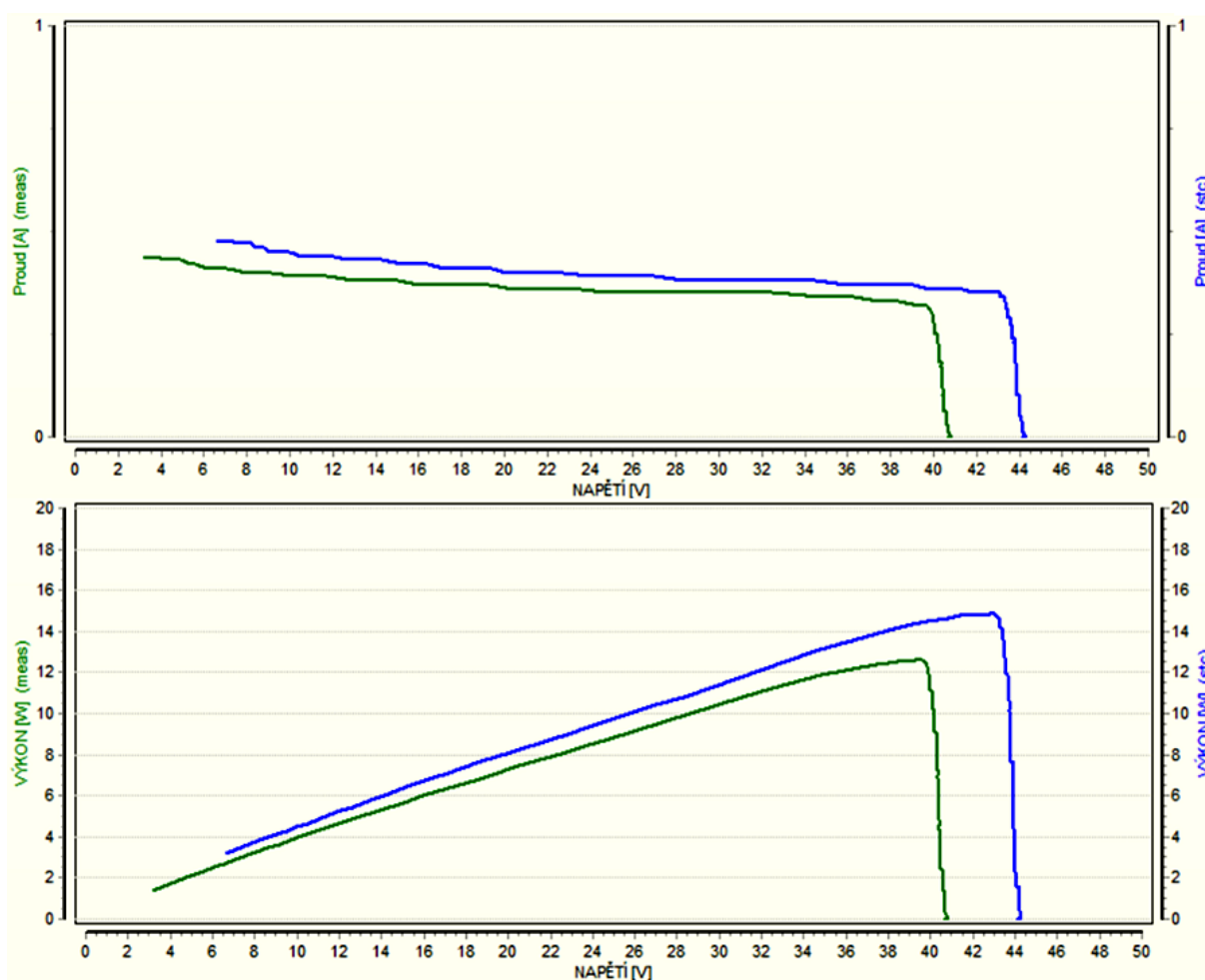
maximální výkon: $P_{mpp} = 75 \text{ W}$.

U panelu, který má zastíněnou jednu celou svislou řadu, dochází u I-V křivek oproti předchozímu případu jen k malým změnám. Totéž platí při porovnání vypočtených STC hodnot. Všechny proudy a napětí se liší jen minimálně. Z toho vyplývá, že i ke změně výkonu zde téměř nedochází. To je způsobeno tím, že v obou případech je celá svislá řada fotovoltaických článků překlenuta pomocí bočníkové diody.

13.5 Zastínění jedné vodorovné řady článků FV panelu



Obrázek č. 62 Schéma – zastínění jedné vodorovné řady článků FV panelu



Obrázek č. 63 I-V křivky při zastínění jedné vodorovné řady FV panelu

Vypočtené STC hodnoty:

napětí naprázdno: $U_{0C} = 44,1 \text{ V}$,

proud nakrátko: $I_{SC} = 0,48 \text{ A}$,

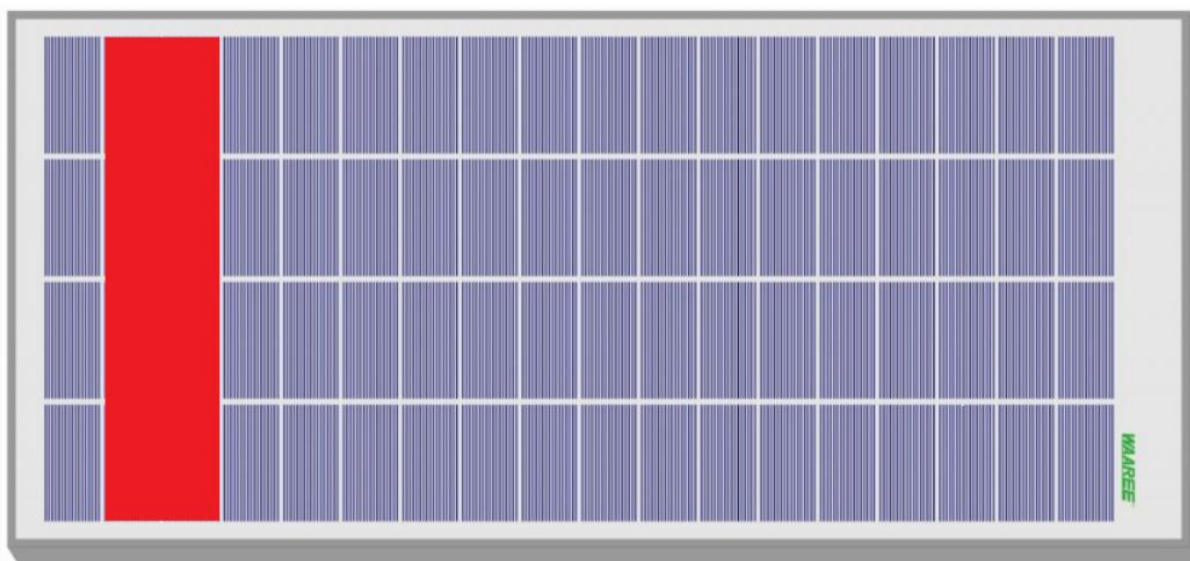
napětí v bodu maximálního výkonu: $U_{mpp} = 43,1 \text{ V}$,

proud v bodu maximálního výkonu: $I_{mpp} = 0,35 \text{ A}$,

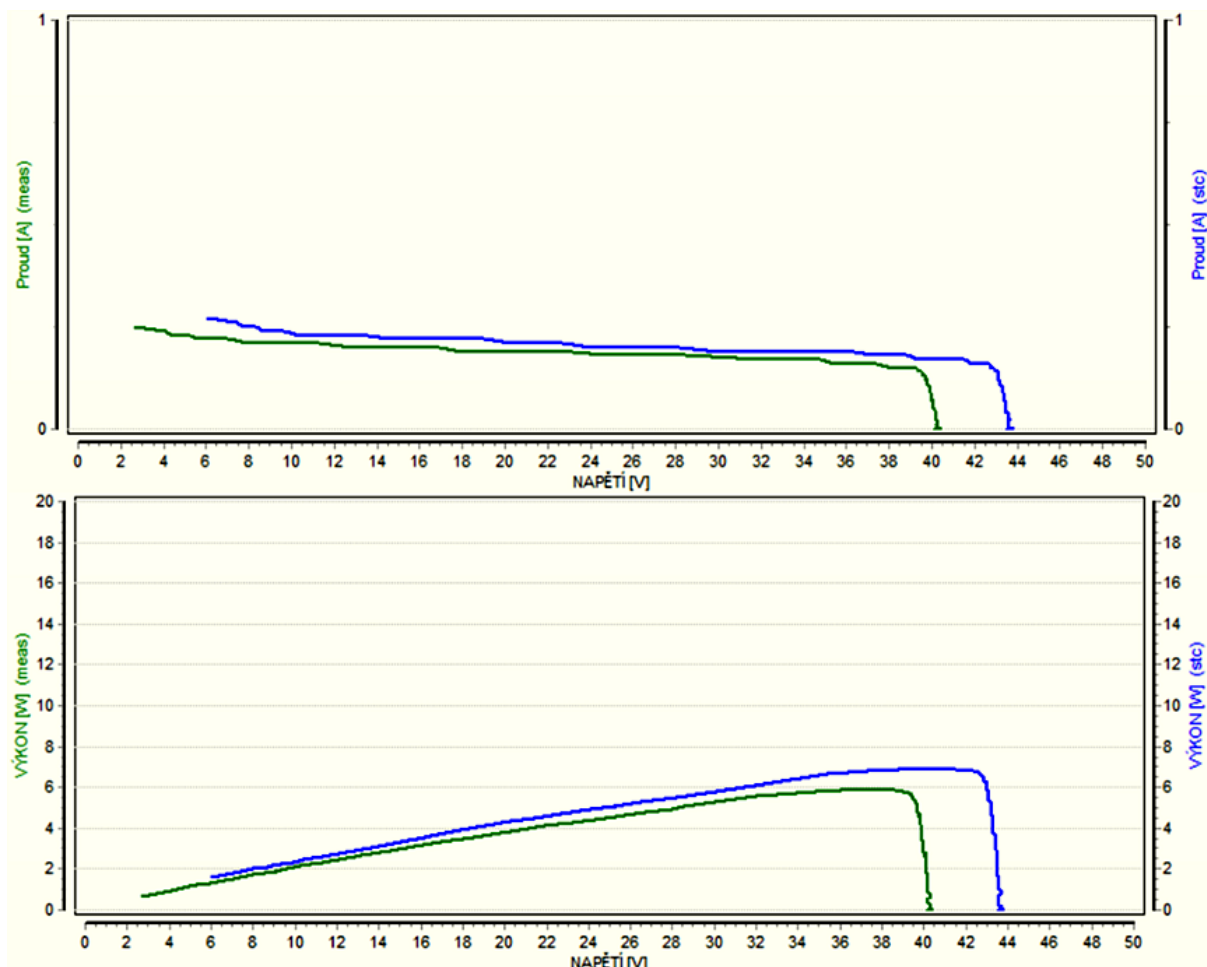
maximální výkon: $P_{mpp} = 15 \text{ W}$.

V případě vodorovného překrytí jedné celé řady dochází k výrazné deformaci I-V křivek. Z vypočtených STC hodnot lze vidět nárůst napětí U_{mpp} , které téměř dosahuje hodnoty napětí U_{0C} . Oproti nezastíněnému panelu napětí vzrostlo zhruba o 7 V. Dále dochází k velkému poklesu proudů I_{SC} a I_{mpp} . Oproti proudům na nezastíněném panelu zde došlo k poklesu o více než 3,6 A. Pokles proudu má za následek snížení celkového výkonu o 127 W. Výsledný výkon tedy dosahuje hodnoty 15 W. To odpovídá přibližně 10,5 % výkonu P_{mpp} u nezastíněného panelu. V porovnání s panelem, u kterého byla zastíněna jedna svislá řada článků, zde dochází k většímu poklesu proudu, a tím i výkonu. Z toho lze usoudit, že vodorovné zastínění má na výsledný výkon panelu větší vliv než svislé zastínění.

13.6 Zastínění dvou vodorovných řad článků FV panelu



Obrázek č. 64 Schéma – zastínění dvou vodorovných řad článků FV panelu



Obrázek č. 65 I-V křivky při zastínění dvou vodorovných řad FV panelu

Vypočtené STC hodnoty:

napětí naprázdno: $U_{OC} = 43,5 \text{ V}$,

proud nakrátko: $I_{SC} = 0,27 \text{ A}$,

napětí v bodu maximálního výkonu: $U_{mpp} = 41,5 \text{ V}$,

proud v bodu maximálního výkonu: $I_{mpp} = 0,17 \text{ A}$,

maximální výkon: $P_{mpp} = 7 \text{ W}$.

V případě vodorovného překrytí dvou celých řad dochází oproti případu, kdy byla zastíněna pouze jedna řada k dalšímu poklesu na proudové a výkonové ose I-V křivek. Ke změnám napětí u vypočtených STC hodnot zde téměř nedochází. Naopak velikosti proudů I_{SC} a I_{mpp} jsou zde oproti předchozímu případu poloviční. To má za následek i pokles výsledného výkonu na polovinu, a to konkrétně na 7 W oproti předchozím 15 W.

14 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala diagnostikou vybraného fotovoltaického systému. Pro diagnostiku byly použity měřicí přístroj METREL Eurotest PV MI 3108 a termokamera FLIR T420. Měřicím přístrojem od firmy METREL bylo postupně provedeno měření izolačního odporu, měření U_{OC} a I_{SC} , měření I-V křivek, test FV panelů ve stringu a test invertoru. Během všech měření probíhalo také měření aktuální hodnoty ozáření a teploty pomocí vzdálené jednotky, ke které byl připojený monokrystalický PV referenční článek a sonda pro měření teploty. Po dokončení všech měření bylo možné z hodnot ozáření a teploty přepočítat všechny naměřené hodnoty na hodnoty při STC podmínkách. Z vypočtených STC hodnot byly následně pro všechna měření vytvořeny tabulky, které udávají odchylku STC hodnot vůči jmenovitým hodnotám, které udává výrobce FV panelů.

Ve všech případech docházelo k výrazným odchylkám oproti jmenovitým hodnotám. U stringů č. 5, 6 a 7 byly tyto odchylky způsobeny asi dvoumetrovým komínem, který částečně zastínil panely těchto stringů. Vlivu zastínění by se však dalo předejít z důvodu, že komín, který toto zastínění způsoboval, už není dnes využíván, tudíž může být odstraněn. Odchylky se ovšem nacházely i u stringů, které zastíněny nebyly. To mohlo být způsobeno z několika příčin. První příčinou může být stáří celého fotovoltaického systému. Měřený systém byl v době měření již více než 7 let starý. Toto stáří může být jednou z příčin odchylky.

Druhou příčinou může být zanedbání údržby fotovoltaického systému. Celý systém nesl známky silného znečištění. Toto znečištění bylo nejvýraznější u stringu č. 4. Vlivem znečištění se na osmi panelech tohoto stringu nacházela horká místa, která měla za následek výrazné snížení výkonu celého stringu. Také kabelová vedení a jejich spoje, které byly vystaveny různým atmosférickým vlivům, mohly mít horší přenosové schopnosti. Z toho důvodu bych majiteli systému doporučil provést kompletní údržbu celého systému, zahrnující očištění povrchů všech panelů a kontrolu spojů kabelových vedení.

Další možnou příčinou může být potenciální indukovaná degradace (PID). Ta se obvykle objevuje u starších panelů a způsobuje výrazné snížení výkonu celého systému. Diagnostika PID je však velice obtížná. Při tomto jevu bývá napětí na záporném pólu stringu výrazně nižší než na kladném pólu. Proto by bylo dobré provést měření napětí na jednotlivých panelech. Pokud by napětí u panelů na záporném pólu stringu bylo nižší než na straně kladného pólu, mohla by to být první známka PID. Lepší možností by však bylo provedení diagnostiky pomocí elektroluminiscence. Pokud je vliv PID diagnostikován v počáteční fázi, je možné takto postižené panely částečně regenerovat. Regeneraci je možné realizovat například pomocí zařízení zvaného „PID Doctor“ od firmy EICERO. Toto zařízení se připojí sériově nebo paralelně mezi fotovoltaické panely a invertor. Ihned po připojení začne poškozené panely regenerovat. V krátké době jim téměř vrátí jejich původní výkon a zároveň je ochrání před další degradací.

Hlavním důvodem odchylky však pravděpodobně bude nízká úroveň intenzity ozáření. Měření v rámci této práce bylo prováděno během října, kdy už ani za jasných slunečných dní nebyla intenzita ozáření dostatečná. Pro nejpřesnější přepočet je doporučena hodnota $1\,000\text{ W/m}^2$. V průběhu měření se však hodnoty ozáření pohybovaly okolo 600 W/m^2 . To mohlo mít za následek výrazné chyby.

V praxi se při ozáření $500\text{--}600\text{ W/m}^2$ může u starších systémů odchylka pohybovat i kolem 10-15 %. Pro lepší výsledky bych tedy doporučil provádět měření při větší hodnotě ozáření.

Okamžité naměřené hodnoty však jsou téměř ve všech případech částečně zkreslené. Lepší možností by tedy bylo použití systému s monitoringem, u kterého by se porovnávalo celkové množství vyrobené energie za delší časové období (např. rok). Pro přesnější hodnoty by bylo vhodné na panely umístit optimizéry, díky kterým lze mít přehled o stavu jednotlivých panelů. Tyto optimizéry vyrábí například firma Tigo.

15 Seznam použité literatury

- [1] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika: elektrická energie ze slunce*. Praha: EkoWATT, 2009. ISBN 978-80-87333-01-3.
- [2] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [3] HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. *Fotovoltaické systémy: energetická příručka: pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost*. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.
- [4] ČSN EN 62446-1: *Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [5] *HANDBOOK: Measurements on PV systems* [online]. Horjul, Slovenia, 2012. 56s [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://emona.com.au/images/support/Measurements%20on%20PV%20systems_Ang.pdf
- [6] *EurotestPV MI 3108 Instruction manual* [online]. Horjul, Slovenia, 2013. 123s [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://smsystems.co.in/metral/MI_3108_EurotestPV_ANG_Ver_1.4_20_751_987.pdf
- [7] LUQUE, Antonio a Steven HEGEDUS. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003 [cit. 2020-03-15]. ISBN 0-471-49196-9.
- [8] GOETZBERGER, Adolf a Volker HOFFMANN. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Berlin: Springer, 2005. ISBN 3-540-23676-7.
- [9] WAAREE: One with the Sun. In: www.gme.cz [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.522-088.1.pdf>
- [10] Fotovoltaické panely a sníh. www.tzb-info.cz [online]. 2010 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6177-fotovoltaicke-panely-a-snih>
- [11] Co ovlivňuje výrobu elektrické energie z fotovoltaické elektrárny. www.silektro.cz [online]. [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <https://www.silektro.cz/solarni-elektrarny/o-fotovoltaice/co-ovlinuje-vyrobu-elektricke-energie-ze-solarni-elektrarny>
- [12] Vliv sklonu a orientace. www.ekowatt.cz [online]. 2008 [cit. 2019-09-17]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/vliv-sklonu-orientace.php>
- [13] HOŘAVA, Pavel. *ANALÝZA OPRÁVNĚNOSTI VYUŽITÍ SOLÁRNÍCH NATÁČECÍCH ZAŘÍZENÍ PRO FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY V DANÉ LOKALITĚ* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7273/Analiza%20opravenosti%20vyuziti%20solarnic%20natacecich%20zarizeni%20pro%20fotovoltaicke%20systemy%20v%20dane%20lokalite.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. VUT Brno.

-
- [14] VALA, Zbyněk. *FOTOLUMINISCENČNÍ METODY DETEKCE DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ* [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-10-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14213. Diplomová práce. VUT Brno.
- [15] KROUTIL, Roman. *KOMPLEXNÍ PROVOZNÍ DIAGNOSTIKA FVE-T14 - OPATŘENÍ PRO OPTIMALIZACI PROVOZU* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-10-01]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/59859/Komplexni%20provozni%20diagnostika%20FVE-T14%20opatreni%20pro%20optimalizaci%20provozu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. VUT Brno.
- [16] Solar Panel Delamination. *www.review.solar* [online]. 2018 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <https://review.solar/solar-panel-delamination/>
- [17] Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu. *www.tzb-info.cz* [online]. 2015 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltackych-elektraren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [18] BENDA, Vítězslav, Kamil STANĚK a Petr WOLF. *Fotovoltaičné systémy* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf. VUT Brno.
- [19] SPIEGEL, Colleen. *Components of a Photovoltaic System* [online]. 2018 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/components-of-a-photovoltaic-system>
- [20] TOMESŠ, Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011*. Ostrava, 2012 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://uniesoudnichznalcu.cz/public/media/files/e04-2012.pdf>
- [21] INDRA, Jiří. *DEGRADACE SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ SVĚTLEM* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28006. Diplomová práce. VUT Brno.
- [22] JANDOVÁ, Kristýna. *DIAGNOSTICKÉ METODY PLOŠNÉHO ROZLOŽENÍ DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10267. Disertační práce. VUT Brno.
- [23] Solar-frontier.eu. *www.solar-frontier.eu* [online]. 2014 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.solar-frontier.eu/en/news/useful-information/detail/wussten-sie-das-schon-lid-noch-ein-kuerzel-mit-dem-wir-sie-vertraut-machen-und-warum-die-solar-frontier-cis-technologie-auch-hier-besticht>
- [24] Sluneční elektrárny. In: *www.svetenergie.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny-2/slunecni-elektrarny/charakteristika>
- [25] Solární baterie Victron Energy GEL 165Ah . In: *www.eshop.neosolar.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://eshop.neosolar.cz/solarni-baterie-victron-energy-gel-165ah>
- [26] Konstrukce termokamery. In: *www.termokamera.cz* [online]. [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery>

-
- [27] Regulátor nabíjení pro solární panely 10A 12V/24V. In: *www.arduino-shop.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/1563-regulator-nabijeni-pro-solarni-moduly-10a-12v-24v.html>
- [28] VANĚK, Jiří. *Diagnostické metody fotovoltaických článků založené na generačně rekombinačních jevech* [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=1227&publikace_id=14025. Zkrácená verze habilitační práce. VUT Brno.
- [29] Thermografie. In: *www.pv-reinigung.eu* [online] [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.pv-reinigung.eu/thermografie/>
- [30] Detekce vad u fotovoltaických panelů. In: *www.tzb-info.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18366-detekce-vad-u-fotovoltaickych-panelu>
- [31] Solar Service. In: *www.solarservice-tx.com* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://solarservice-tx.com/solar-cleaning/should-i-clean-my-solar-panels/>
- [32] Solar Industry. In: *www.solarindustrymag.com* [online]. 2019 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://solarindustrymag.com/bye-bye-bi-facial>
- [33] Solar Trackers. In: *www.spiritenergy.co.uk* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.spiritenergy.co.uk/kb-pv-solar-trackers>
- [34] Revizní přístroje: METREL. In: *www.reviznipristroje.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.reviznipristroje.cz/>
- [35] METREL: Optional accessories. In: *www.metrel.co.uk* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.metrel.co.uk/uk/shop/sets/mi-3109-ps.html>
- [36] TERMOKAMERA FLIR T420, T440, T460. In: *www.termokamery-flir.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamery-flir-t4x0/>
- [37] Solární elektrárny. In: *www.solarniexperti.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/jak-funguje-ostrovni-off-grid-fotovoltaicky-system/schema-zapojeni-ostrovniho-systemu-s-elektrocentralou/>
- [38] Obnovitelné zdroje: Slepá cesta pro energetiku? In: *www.elektrina.cz* [online]. 2020 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/obnovitelne-zdroje-slepa-cesta>
- [39] SOLAR POWER OPTIMIZATION. In: *www.mnmsolar.com* [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://mnmsolar.com/power-optimization.php>
- [40] AURORA střídač pro fotovoltaické systémy: PVI–10.0–OUTD/PVI–12.5–OUTD. In: *www.solarnivyroba.cz* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: http://www.solarnivyroba.cz/system/files/page/2013/02/4.3.1_menic_power_one_-_10.0._a_12.5_cz.pdf
- [41] How to Figure Out the Plus and Minus Terminals of a Solar Panel. In: *www.altestore.com* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.altestore.com/blog/2017/07/solar-panels-plus-minus-terminals/#.Xm36oKhKhPY>
- [42] Ningbo Qixin Solar Electrical Appliance Co, ltd. In: *www.nbqxsolar.com* [online]. 2010 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <http://www.wiatraki.murat.pl/karta.pdf>